



---

Journal of Technology for Architecture and Environment

25 | 2023

Poste Italiane spa - Tassa pagata - Piego di libro  
Aut. n. 072/DCB/RI/VF del 31/03/2005



# RUOLI ABILITANTI DELLA TECNOLOGIA

enabling roles of technology

# TECHNE

Journal of Technology for Architecture and Environment

Issue 25  
Year 13

**Direttore/Director**  
Mario Losasso

**Comitato Scientifico/Scientific Committee**  
Gabriella Caterina, Gianfranco Dioguardi, Paolo Felli, Luigi Ferrara,  
Cristina Forlani, Rosario Giuffré, Franz Graf, Helen Lochhead,  
Maria Teresa Lucarelli, Lorenzo Matteoli, Gabriella Peretti, Edo Ronchi,  
Fabrizio Schiaffonati, Paolo Tombesi, Maria Chiara Torricelli

**Direttore Editoriale/Editor in Chief**  
Elena Mussinelli

**Comitato Editoriale/Editorial Board Members**  
Filippo Angelucci, Valeria D'Ambrosio, Pietromaria Davoli,  
Tiziana Ferrante, Paola Gallo, Francesca Giglio, Massimo Lauria

**Assistenti Editoriali/Assistant Editors**  
Alessandro Claudi De Saint Mihiel, Valentina Puglisi, Antonella Violano,  
Francesca Thiébat

**Segreteria di Redazione/Editorial Staff**  
Francesca Anania, Nazly Atta, Giovanni Castaldo, Maria Fabrizia Clemente,  
Serena Giorgi, Giuseppe Mangano, Giulia Vignati

**Progetto grafico/Graphic Design**  
Veronica Dal Buono

**Progettazione grafica esecutiva/Executive Graphic Design**  
Giulia Pellegrini

**Editorial Office**  
c/o SITdA onlus,  
Via Toledo 402, 80134 Napoli  
Email: [redazionetechne@sitda.net](mailto:redazionetechne@sitda.net)

**Issues per year: 2**

**Publisher**  
FUP (Firenze University Press)  
Phone: (0039) 055 2743051  
Email: [journals@fupress.com](mailto:journals@fupress.com)

Journal of SITdA (Società Italiana della Tecnologia dell'Architettura)

## REVISORI / REFEREES

Per le attività svolte nel 2021-2022 relative al Double-Blind Peer Review process, si ringraziano i seguenti Revisori:

*As concern the Double-Blind Peer Review process done in 2021-2022, we would thanks the following Referees:*

### 2021

Davide Allegri, Filippo Angelucci, Erminia Attaianese, Serena Baiani, Adolfo Baratta, Antonio Basti, Oscar Bellini, Stefano Bellintani, Mariangela Bellomo, Roberto Bolici, Maddalena Buffoli, Laura Calcagnini, Filippo Calcerano, Marta Calzolari, Andrea Campioli, Corrado Carbonaro, Francesca Castagneto, Cristiana Cellucci, Andrea Ciaramella, Paolo Civiero, Carola Clemente, Luigi Cocchiarella, Christina Conti, Alessandra Cucurnia, Valeria D'Ambrosio, Domenico D'Olimpo, Roberto Di Giulio, Antonella Falotico, Daniele Fanzini, Massimo Ferrari, Rossella Franchino, Matteo Gambaro, Jacopo Gaspari, Maria Luisa Germanà, Andrea Giachetta, Elisabetta Ginelli, Francesca Giofrè, Mattia Leone, Danila Longo, Adriano Magliocco, Laura Malighetti, Martino Milardi, Antonello Monsu' Scolaro, Elena Piera Montacchini, Marzia Morena, Ingrid Paoletti, Spartaco Paris, Angela Pavesi, Claudio Piferi, Paola Pleba, Donatella Radogna, Raffaella Riva, Rosa Romano, Massimo Rossetti, Sergio Russo Ermolli, Fabrizio Schiaffonati, Simone Secchi, Cesare Sposito, Cinzia Talamo, Andrea Tartaglia, Valeria Tatano, Benedetta Terenzi, Enza Tersigni, Fabrizio Tucci, Renata Valente, Maria Pilar Vettori, Antonella Violano, Alessandra Zanelli.

### 2022

Davide Allegri, Vitangelo Ardit, Paola Ascione, Erminia Attaniese, Adolfo Baratta, Antonio Basti, Oscar Bellini, Stefano Bellintani, Mariangela Bellomo, Roberto Bolici, Maddalena Buffoli, Laura Calcagnini, Marta Calzolari, Andrea Campioli, Eliana Cangelli, Corrado Carbonaro, Francesca Castagneto, Cristiana Cellucci, Andrea Ciaramella, Paolo Civiero, Carola Clemente, Christina Conti, Alessandra Cucurnia, Domenico D'olimpio, Alberto De Capua, Federico De Matteis, Pasquale De Toro, Roberto Di Giulio, Daniele Fanzini, Rossella Franchino, Matteo Gambaro, Jacopo Gaspari, Maria Luisa Germanà, Andrea Giachetta, Mattia Leone, Nora Lombardini, Danila Longo, Maria Teresa Lucarelli, Adriano Magliocco, Paola Marrone, Antonio Mazzeri, Martino Milardi, Antonello Monsu' Scolaro, Elena Piera Montacchini, Indrid Paoletti, Spartaco Paris, Francesco Pastura, Angela Pavesi, Donatella Radogna, Manuela Raitano, Raffaella Riva, Massimo Rossetti, Monica Rossi-Schwarzenbeck, Fabrizio Schiaffonati, Andrea Sciascia, Cesare Sposito, Enza Tersigni, Corrado Trombetta, Fabrizio Tucci, Renata Valente, Maria Pilar Vettori, Alessandra Zanelli.

# SIT<sub>d</sub>A

Società Italiana della Tecnologia  
dell'Architettura



# RUOLI ABILITANTI DELLA TECNOLOGIA ENABLING ROLES OF TECHNOLOGY

## INTRODUZIONE AL TEMA *INTRODUCTION TO THE ISSUE*

- 7 | Evoluzione e ruolo delle tecnologie  
*Development and role of technologies*  
Mario Losasso, Presidente SITdA

## EDITORIALE *EDITORIAL*

- 11 | Tecnologie abilitanti e qualità del progetto  
*Enabling technologies and project quality*  
Elena Mussinelli

## DOSSIER a cura di/*edited by* Filippo Angelucci e Pietromaria Davoli

- 16 | Declinazioni e dimensioni abilitanti della Tecnologia in architettura: un dibattito complesso  
*Enabling variations and dimensions of Technology in architecture: a complex debate*  
Filippo Angelucci, Pietromaria Davoli
- 23 | Intervista a Nicola Emery  
*Interview with Nicola Emery*  
Nicola Emery, Filippo Angelucci, Pietromaria Davoli
- 29 | L'animale interdisciplinare  
*The interdisciplinary animal*  
Maurizio Ferraris
- 38 | Tecnologia come discorso sul metodo e sul progetto  
*Technology as a discourse on method and on design*  
Paolo Tombesi

## REPORTAGE a cura di/*edited by* Francesca Thiébat

- 48 | Habitat intelligenti e auto-sufficienti: il ruolo della Tecnologia per il futuro dell'architettura  
*Intelligent, self-sufficient habitats: the role of Technology for the future of architecture*  
Francesca Thiébat

## CONTRIBUTI *CONTRIBUTIONS*

### SAGGI E PUNTI DI VISTA *ESSAYS AND VIEWPOINTS*

- 55 | Linee evolutive nell'uso dell'intelligenza artificiale a supporto della progettazione architettonica  
*Evolutionary trends in the use of artificial intelligence in support of architectural design*  
Gian Luca Brunetti
- 61 | Tecnologie, processi e strumenti tra innovazione e qualità progettuale  
*Technologies, processes and tools between innovation and design quality*  
Andrea Tartaglia
- 68 | Supporto o automazione nelle decisioni: il ruolo dell'intelligenza artificiale per il progetto  
*Support or automation in decision-making: the role of artificial intelligence for the project*  
Tiziana Ferrante, Federica Romagnoli
- 78 | *Urban Digital Twin* e pianificazione urbana per la città sostenibile  
*Urban Digital Twin and urban planning for sustainable cities*  
Alessandra Barresi
- 84 | Cittadinanza energetica. Strumenti e tecnologie per abilitare la transizione nei distretti  
*Energy citizenship. Tools and technologies to enable transition in districts*  
Danila Longo, Saveria Olga Murielle Boulanger, Martina Massari, Giulia Turci
- 93 | *Design by data*. Dalle interfacce alle architetture responsive  
*Design by data. From interfaces to responsive architectures*  
Attilio Nebuloni, Giorgio Buratti

## RICERCA E SPERIMENTAZIONE RESEARCH AND EXPERIMENTATION

- 101 | Tecnologie e spazi di prossimità: strumenti per scelte consapevoli nella transizione ecologica  
*Technologies and proximity spaces: tools for conscious choices in ecological transition*  
 Paola Marrone, Ilaria Montella, Federico Fiume
- 116 | Il modello Coast-RiskBySea per il supporto decisionale al progetto climate proof  
*The Coast-RiskBySea model for climate proof decision-making support*  
 Maria Fabrizia Clemente
- 124 | Dal CFD al GIS: una metodologia per l'implementazione di database georeferenziati sul microclima urbano  
*From CFD to GIS: a methodology to implement urban microclimate georeferenced databases*  
 Matteo Trane, Guglielmo Ricciardi, Mattia Scalas, Marta Elena
- 134 | Piattaforma di simulazione energetica a supporto della progettazione/gestione degli edifici  
*Energy simulation platform supporting building design and management*  
 Giacomo Chiesa, Francesca Fasano, Paolo Grasso
- 143 | Tecnologie abilitanti per supportare la transizione energetica nell'ambito dell'edilizia sociale  
*Enabling technologies to support energy transition in social housing*  
 Jacopo Gaspari, Ernesto Antonini, Lia Marchi
- 153 | Tecnologie capacitanti per ambienti adattivi: il caso studio Living Hub  
*Capacitating technologies for adaptive environments: the Living Hub case study*  
 Niccolò Casiddu, Claudia Porfirione, Annapaola Vacanti
- 162 | Il progetto 4CH e le tecnologie abilitanti nella salvaguardia del Patrimonio Culturale  
*The 4CH project and enabling technologies for safeguarding the Cultural Heritage*  
 Andrea Boeri, Serena Orlandi, Rossella Roversi, Beatrice Turillazzi
- 173 | Rome Local Climate Zone (RLCZ): strumento di supporto decisionale per la città storica  
*Rome Local Climate Zone (RLCZ): decision-making support tool for the historical city*  
 Gaia Turchetti
- 182 | La tecnologia come interfaccia abilitante negli spazi di transizione per lo smart Heritage  
*Technology as enabling interface within transition spaces for the smart Heritage*  
 Marta Calzolari, Valentina Frighi, Valentina Modugno
- 192 | Dar forma a spazi pubblici accessibili per le persone con limitazioni visive. L'esperienza di ricerca BUDD-e  
*Shaping accessible public spaces for visually impaired people. The BUDD-e research experience*  
 Andrea Rebecchi, Marcello Farina, Giuseppe Andreoni, Stefano Capolongo, Matteo Corno, Paolo Perego, Emanuele Lettieri
- 204 | Abilitare una esperienza aumentata dell'edificio con il coinvolgimento degli utenti  
*Enabling an augmented building experience by encouraging user engagement*  
 Antonella Trombadore, Debora Giorgi, Gisella Calcagno, Giacomo Pierucci
- 214 | Tecnologie abilitanti per l'economia circolare nel settore edilizio  
*Enabling technologies for circular economy in the construction sector*  
 Monica Lavagna, Serena Giorgi, Daniela Pimponi, Andrea Porcaro
- 225 | Un nuovo strumento di informazione come tecnologia abilitante: applicazione e simulating  
*A new information tool as an enabling technology: application and simulation*  
 Francesca Ciampa, Caterina Claudia Musarella
- 233 | Stampa 3D robotizzata: valorizzazione di processi progettuali e costruttivi a Detroit  
*Enhancing the workforce in construction: robotic concrete printing in Detroit*  
 Sara Codarin
- 243 | L'Internet of Things per la transizione circolare nel settore delle facciate  
*The Internet of Things for circular transition in the façade sector*  
 Matteo Giovanardi, Thaleia Konstantinou, Riccardo Pollo, Tillmann Klein
- 252 | Sfruttare l'intelligenza naturale del legno per migliorare la ventilazione passiva degli edifici  
*Harnessing the natural intelligence of wood to improve passive ventilation in buildings*  
 Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Giulia Pelliccia, David Correa

## DIALOGO DIALOGUE a cura di/edited by Antonella Violano

- 260 | Nuove frontiere digitali per il progetto: un processo propositivo/interattivo  
*New digital frontiers for design: a proactive/interactive process*  
Anna Maria Giovenale/Pietro Montani

- 266 | RECENSIONI REVIEWS a cura di/edited by Francesca Giglio

- 268 | Sergio Russo Ermolli, *The Digital Culture of Architecture. Note sul cambiamento cognitivo e tecnico tra continuità e rottura*  
Serena Baiani
- 270 | Consuelo Nava, *Ipersostenibilità e tecnologie abilitanti. Teoria, metodo e progetto*  
Federica Ottone
- 272 | Neil Leach, *Architecture in the Age of Artificial Intelligence. An Introduction to AI for Architects*  
Marina Rigillo

## INNOVAZIONE E SVILUPPO INDUSTRIALE INNOVATION AND INDUSTRIAL DEVELOPMENT

a cura di/edited by Alessandro Claudi de Saint Mihiel

- 274 | Efficienza energetica e soluzioni tecniche di involucro massive  
*Energy efficiency and massive envelope solutions*  
Alessandro Claudi de Saint Mihiel



Mario Losasso, Presidente SITdA, <https://orcid.org/0000-0003-3251-8747>  
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia

losasso@unina.it

### Il dibattito sulle tecnologie abilitanti

In base alla definizione fornita dalla Commissione Europea, le *tecnologie abilitanti* rappresentano tecnologie «ad alta intensità di conoscenza e associate a elevata attività di Ricerca e Sviluppo, a cicli di innovazione rapidi, a consistenti spese d’investimento e a posti di lavoro altamente qualificati» (Commissione Europea, 2012). Le tecnologie abilitanti hanno quindi una rilevanza sistematica poiché alimentano il valore delle filiere produttive sviluppando la capacità di innovare i processi, i prodotti e i servizi in vari settori. Un prodotto, materiale o immateriale, che risulta basato su tecnologie abilitanti utilizza infine tecnologie avanzate, accrescendo in tal modo il valore economico e sociale di beni o servizi (BE Innovazione, 2019). Quello delle tecnologie abilitanti è un concetto largamente utilizzato con riferimento alla cosiddetta “quarta rivoluzione industriale”, la rivoluzione delle connessioni ovvero della crescente compenetrazione tra mondo fisico, digitale e biologico. In un recente studio del Boston Consulting Group – multinazionale USA di consulenza strategica qualificabile come *best-think tank* globale nel campo dei processi gestionali – emerge quanto la quarta rivoluzione industriale sia centrata sull’adozione di tecnologie avanzate (fra cui *advanced manufacturing solution, additive manufacturing, augmented reality, simulation*). Se alcune tecnologie risultano già consolidate, fino ad oggi alcune di esse hanno operato in una condizione sostanzialmente circoscritta (Boston Consulting Group, 2015): da un lato, infatti, sono state confinate in campi di ricerca applicata e, dall’altro, in sistemi di produzione che non ne hanno consentito uno sviluppo in una condizione basata sull’interconnessione collaborativa tra ambienti, sistemi e tecnologie.

### DEVELOPMENT AND ROLE OF TECHNOLOGIES

**The debate on enabling technologies**  
According to the definition provided by the European Commission, key enabling technologies (KETs) represent technologies that are «knowledge-intensive and associated with high R&D activity, rapid innovation cycles, substantial investment expenditure and highly skilled jobs» (European Commission, 2012). KETs, therefore, have systemic relevance as they feed the value of production chains by developing a capacity to innovate processes, products and services in various sectors. A product, tangible or intangible, that is based on KETs utilises advanced technologies, thereby increasing the economic and social value of goods or services (BE Innovation, 2019). The concept of enabling technologies is widely used with reference to the so-called ‘fourth industrial revolution’, the revolution of connections and the

Il concetto di tecnologie abilitanti è utilizzato da alcuni anni con riferimento a set di tecnologie direttamente connesse all’innovazione e finalizzate a proporre soluzioni migliorative per processi, prodotti e servizi in cui uno dei principali fattori qualificanti è la connessione con trasferimento di dati, informazioni e operatività fra macchine o prodotti. La matrice prevalentemente digitale di queste tecnologie nasce con uno sguardo all’ambito imprenditoriale e si coniuga con una forte integrazione fra ricerca e industria.

Nel campo dell’architettura, tali tecnologie sono in continua evoluzione e applicazione, mantenendo una relazione con il mondo fisico che la disciplina, per sua natura, è chiamata a “costruire”, riqualificare e organizzare attraverso tecnologie e materiali che oggi si combinano con gli scenari dell’ambiente di lavoro digitale. Questa situazione colloca il progetto architettonico in una condizione di forte contaminazione fra concezione e realizzazione: per esempio, nelle nuove modalità indotte dai processi di *digital manufacturing*, l’ottimizzazione dell’uso dei materiali nelle loro molteplici combinazioni viene incorporata in un momento ibrido fra progetto architettonico e progettazione della sua fabbricazione. L’estensione della fase progettuale alla produzione e al montaggio determina, infatti, un unicum di fasi che un tempo erano separate e che oggi sono, in prospettiva, sempre più interdipendenti.

Nell’evoluzione del rapporto tra scienza e tecnologia, l’integrazione delle *key enabling technologies* innalza il campo d’azione delle tecnologie che diventano un *medium* tra sistemi (Cantrell and Holzman, 2016). Le tecnologie abilitanti consentono, in tal modo, una comprensione sintetica della realtà, dilatando l’ambiente costruito verso scenari di un mondo ibridato con tecno-

growing interpenetration between the physical, digital and biological worlds. In a recent study by the Boston Consulting Group – a US multinational strategic consulting firm that qualifies as a global best-think tank on management processes – it emerges how the fourth industrial revolution is centred on the adoption of advanced technologies (including advanced manufacturing solutions, additive manufacturing, augmented reality, simulation). While some technologies are already well established, up to the present, some of them have been operating in a largely circumscribed condition (Boston Consulting Group, 2015). Indeed, on the one hand, certain technologies have been confined to fields of applied research and, on the other hand, to production systems that have not allowed them to be developed in a condition based on the collaborative

interconnection of domains, systems and technical tools.

The concept of enabling technologies has been used with reference to sets of technologies directly related to innovation, aimed at proposing improved solutions for processes, products and services in which one of the main qualifying factors is the connection with data transfer, information and operations between machines or products. The mainly digital matrix of these technologies originates with an entrepreneurial outlook and is combined with strong integration between research and industry.

In the field of architecture, these technologies are continually evolving and being applied, maintaining a relationship with the physical world that the discipline is, by its very nature, called upon to ‘construct’, redevelop and organise through material and technolo-

logie reattive e sensibili per risposte a input variabili. Le categorie del reale e del virtuale tendono così a coincidere in una sola realtà e le tecnologie diventano elementi di mediazione tra più dati e più condizioni operative e organizzative. La portata innovativa della transizione conduce da sistemi edilizi impostati a partire dalle loro componenti verso sistemi in cui si tende a ridurre la contrapposizione fra artefatti e natura, secondo una interdipendenza in equilibrio fra più agenti che sussistono in un unico ambiente di vita (Latour, 2018).

### Dove ci conduce la Tecnica?

Fino a questo punto l'entità dei fattori legati alle tecnologie abilitanti evidenzia un contesto di larga portata innovativa ma non può essere trascurata la preoccupazione, da più parti evidenziata, di una deriva tecnocratica che potrebbe comportare l'evoluzione di un sistema in qualche modo governato dal "mondo della tecnica". La prevalenza di una possibile condizione "ipertecnologica" manifesta, infatti, un rischio di sostituzione della diversità biologica, sociale e culturale con standardizzazioni automatizzate (Stiegler, 2019). Nella compressione spazio-temporale della contemporaneità, con l'uso massiccio delle tecnologie digitali si perdono le connotazioni certe, sostituite da condizioni "dinamiche" nella transizione da rassicuranti parole d'ordine quali funzioni, pienezza, stabilità o permanenza verso altri concetti espressi da termini quali esplorazione, dispersione, volatilità, traiettoria, movimento, impermanenza (Baricco, 2018).

Il mondo contemporaneo è così da più parti identificato con l'epoca della Tecnica, che rappresenta una sfera planetaria nella quale sono immersi il mondo globale, le comunità e ogni sin-

gies that today are combined with the digital working environment. This situation places architectural design in a condition of strong contamination between conception and realisation: for example, in the new modalities induced by digital manufacturing processes, the optimisation of the use of materials in their multiple combinations is embedded in a hybrid phase between architectural design and manufacturing design. The extension of the design phase to production and assembly determines, in fact, a unicum of phases that were once separate and are today, in perspective, increasingly interdependent.

In the evolving relationship between science and technology, the integration of key enabling technologies raises the scope of technologies to become a *medium* between systems (Cantrell and Holzman, 2016). Thus, enabling

technologies allow a synthetic understanding of reality, expanding the built environment towards scenarios of a world hybridised with responsive and sensitive technologies for answers to variable inputs. The categories of real and virtual thus tend to coincide in a single reality, and technologies become mediating elements between more data, more operational and managerial conditions. The innovative scope of the transition leads from building systems set up from their components towards systems in which the opposition between artefacts and nature is reduced, according to an interdependence balanced between several agents subsisting in a single living environment (Latour, 2018).

#### Where does Technique lead us?

Up to this point, the magnitude of the enabling technology factors highlights

golo individuo. Nel contesto attuale, le tecniche vanno intese come mezzi o strumenti per raggiungere determinati fini e vanno distinte dalla tecnologia che rappresenta invece il pensiero critico sulla scelta e sull'uso delle tecniche. Nell'accezione corrente, la categoria globale della tecnica nel suo sviluppo contemporaneo include le tecniche, le tecnologie e la scienza come fattore di produzione. Numerosi studiosi identificano l'epoca della tecnica come l'ambiente in cui essa si esprime nella sua espansione attraverso scenari che diventano sempre più pervasivi. «La nostra capacità di fare è enormemente superiore alla nostra capacità di prevedere gli effetti del nostro fare [...] per cui la tecnica può segnare quel punto assolutamente nuovo nella storia e forse irreversibile dove la domanda non è più che cosa possiamo fare noi con la tecnica ma che cosa la tecnica può fare di noi» (Anders, 2003, cit. in Galimberti, 2020).

L'essenza originaria della tecnica non risiede nel "fare" né nell'utilizzazione di mezzi, ma nello "svelare" ciò che è latente nella materia oltre che nella produzione, in quanto svelamento e non in quanto fabbricazione (Galimberti 2020). Tuttavia, la natura oggi non è più il soggetto "produttivo" (*poiesis*) che dispiega la sua forza ma il fondo a disposizione della tecnica contemporanea che processa continuamente prodotti secondo un orizzonte a-finalistico e una antropizzazione pervasiva (Galimberti 2020).

A valle di tali considerazioni, occorre registrare il ribaltamento dell'asse interpretativo della tecnologia come scienza applicata, che si orienta verso una visione in cui la scienza trova le opportunità della sua indagine di conoscenza entro le condizioni di agibilità consentite dalla tecnologia stessa. Essa non è più, come solitamente si crede, un'applicazione della scienza ma l'anima e

a context of broad innovative scope, but the concern of a technocratic drift cannot be overlooked. This could lead to the evolution of a system somewhat governed by the 'world of technology'. The prevalence of a possible 'hyper-technological' condition manifests, in fact, a risk of replacing biological, social and cultural diversity with automated standardisation (Stiegler, 2019). In the space-time compression of contemporaneity, with the massive use of digital technologies, certain meanings are lost, replaced by 'dynamic' conditions in the transition from assuring watchwords such as function, fullness, stability or permanence towards other concepts expressed by terms such as exploration, dispersion, volatility, trajectory, movement, impermanence (Baricco, 2018).

The contemporary world is thus widely identified with the age of Technique,

which represents a planetary sphere in which the global world, communities and each individual are embedded. In the current context, techniques are to be understood as means or instruments to achieve certain goals and are distinguished from technology, which instead represents critical thinking about the choice and use of techniques. In the current understanding, the global category of Technique in its contemporary development includes techniques, technologies and science as a factor of production. Numerous researchers identify the age of technique as the environment in which it expresses itself in its expansion through scenarios that become increasingly pervasive. «Our capacity to do is enormously superior to our capacity to foresee the effects of our doing [...] whereby technique may mark that absolutely new and perhaps irreversible point in history where the

l'essenza della scienza stessa, perché la scienza guarda al mondo per manipolarlo: l'intenzione tecnica è già inscritta nello sguardo scientifico (Galimberti, 2020). Se la tecnica non ha scopi e non è più uno strumento, non promuove un senso né svela la verità poiché la tecnica semplicemente "funziona". L'uomo da soggetto è diventato oggetto dell'operare tecnico tanto che la sua identità è fornita dal ruolo che egli occupa nell'apparato tecnico di appartenenza. L'ordine del mondo non dimora più nel suo essere ma dipende dal fare tecnico e l'efficacia diventa esplicitamente l'unico criterio di verità.

All'interno di questo assetto, molti autori rinvengono il rischio di deriva tecnocratica insito nella pervasività delle tecnologie abilitanti se deprivate di un orizzonte di senso. Se non esistono più fini, viene a cadere anche il valore dell'etica intesa come forma dell'agire in vista di fini, mentre il mondo della tecnica assume come sue finalità i risultati delle sue procedure, condizionando l'etica stessa (Galimberti, 2020). Lo sviluppo delle tecnoscienze secondo Lyotard, in ultima istanza, progredisce con una forza e una motricità autonome indipendenti dagli individui, secondo un progressivo processo di complessificazione in cui la tecnica tende a costituire un'estensione della corteccia cerebrale umana (Lyotard, 1987).

L'evoluzione tecnologica contemporanea si inquadra all'interno di una evoluzione combinatoria che definisce un principio di "ereditarietà" delle tecnologie. Le nuove tecnologie ereditano infatti alcune parti da quelle che le precedono e nascono come combinazione di tecnologie preesistenti, consentendo parametri che le tecnologie esistenti generino, abilitandole, ulteriori tecnologie. Nella contemporaneità, le tecnologie non sono più mezzi autonomi ma sistemi modificabili secondo una serie

question is no longer what we can do with technique but what technique can do with us» (Anders, 2003, cited in Galimberti, 2020).

The original core of technique does not consist in 'making' nor in the use of means, but in 'revealing' what is latent in matter as well as in production, as revealing and not as making (Galimberti 2020). However, nature today is no longer the 'productive' subject (*poiesis*) that deploys its force but the fund at the disposal of contemporary technique that continuously processes products according to an a-finalistic horizon and pervasive anthropisation (Galimberti 2020).

In the wake of these considerations, it is necessary to record the reversal of the interpretative axis of technology as applied science, which is oriented towards a vision in which science finds the opportunities of its investigation

of knowledge within the conditions of practicability allowed by technology itself. It is no longer, as is usually believed, an application of science but the soul and essence of science itself because science looks at the world in order to manipulate it: the technical intention is already inscribed in the scientific vision (Galimberti 2020). If technique has no purpose and is no more a tool, it neither promotes meaning nor reveals truth because technique simply 'works'. Man has gone from being a subject to becoming an object of technical operation to the extent that his identity is provided by the role he occupies in the technical system to which he belongs. The order of the world no longer dwells in his being but depends on technical doing, and effectiveness explicitly becomes the only criterion of truth.

Within this framework, many authors

di combinazioni che costituiscono un apparato disponibile a esprimere una cultura (Brian Arthur, 2011). Se nei mezzi è presente un valore culturale, gli atti tecnici vanno allora collocati nell'ambito degli atti mentali in cui l'intervento tecnico è unitamente un atto concreto culturale, individuale e sociale (Nardi, 2003) attraverso il quale, se correttamente attuato, viene sviluppato un pensiero critico.

La tecnica, se dotata di senso e di finalità, si caratterizza allora come una manifestazione di cultura e ogni intervento tecnico può essere ricondotto alla relazione tra fini e mezzi dove ognuno dei due termini partecipa contemporaneamente a un duplice ordine culturale. Essa si colloca in un punto mediano tra esperienza teorica e sperimentazione pratica, rientrando nell'alternanza continua di questi due termini entro un'organizzazione dei saperi orientata, da un lato, verso la concretezza e la materialità e, dall'altro, verso l'elaborazione generale dei problemi affrontati attraverso il distacco della riflessione (Nardi, 2003).

#### REFERENCES

- Anders, G. (2003), *L'uomo è antiquato, Vol. I: Considerazioni sull'anima nella seconda rivoluzione industriale*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Baricco, A. (2018), *The Game*, Einaudi, Torino.
- BE Innovazione (Ed.) (2019), "Le tecnologie abilitanti del Piano Nazionale Impresa 4.0", *Focus Industria 4.0*.
- Brian Arthur, W. (2011), *La natura della tecnologia*, Codice, Torino.
- Cantrell, B. and Holzman, J. (2016), *Responsive landscapes. Strategies for responsive technologies in landscapes architecture*, Routledge, Denver, UK.
- Commissione Europea (2012), *Le tecnologie abilitanti fondamentali: un ponte per la crescita e per l'occupazione*, available at: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/MEMO\\_12\\_484](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/MEMO_12_484).

find the risk of technocratic tendency within the pervasiveness of enabling technologies if deprived of a vision of meaning. If purposes no longer exist, the value of ethics understood as a form of acting in view of purposes also falls, while the world of technique assumes as its purposes the results of its procedures, conditioning ethics itself (Galimberti, 2020). The development of technosciences, according to Lyotard, ultimately progresses with an autonomous force and motility independent of individuals, according to a progressive process of complexification in which technique tends to constitute an extension of the human cerebral cortex (Lyotard, 1987).

Contemporary technological evolution is framed within a combinatorial evolution that defines a principle of 'inheritance' of technologies. Indeed, new technologies inherit some parts

from those that precede them and are born as a combination of previously existing technologies, equally allowing existing technologies to generate, by enabling them, further technologies. In the contemporary world, technologies are no longer autonomous tools but systems that can be modified according to a series of combinations, which constitute an apparatus available to express a culture (Brian Arthur, 2011). If there is a cultural value in technical tools, technical acts should then be placed in the sphere of mental acts in which technical intervention is a concrete cultural, individual and social act (Nardi, 2003) through which, if correctly implemented, critical thinking is developed.

Technique, if endowed with meaning and purpose, is then characterised as a manifestation of culture, and every technical intervention can be traced

Galimberti, U. (2020), *Heidegger e il nuovo inizio. Il pensiero al tramonto dell'Occidente*, Feltrinelli, Milano.

Latour, B. (2018), *Tracciare la rotta*, Cortina, Milano.

Lyotard J.F. (1987), *Il postmoderno spiegato ai bambini*, Feltrinelli, Milano.

Nardi, G. (2003), *Percorsi di un pensiero progettuale*, Clup, Milano.

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. and Harnisch, M. (2015), *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*, Boston Consulting Group.

Stiegler, B. (2019), *La società automatica. Vol. 1: l'avvenire del lavoro*, Meltimi, Milano.

back to the relationship between purposes and means where each of the two terms simultaneously participates in a dual cultural order. It is placed at a median point between theoretical experience and practical experimentation, being part of the continuous alternation of these two terms within an organisation of knowledge oriented, on the one hand, towards concreteness and materiality and, on the other, towards the general elaboration of problems addressed through the detachment induced by thinking reflection (Nardi, 2003).

Elena Mussinelli, <https://orcid.org/0000-0002-4521-522X>

Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

[elena.mussinelli@polimi.it](mailto:elena.mussinelli@polimi.it)

La Call per il n. 25 di TECHNE nasce da un interessante dibattito sviluppatisi all'interno del Comitato Editoriale della rivista e da uno stimolante confronto con alcuni membri del Comitato Scientifico (Paolo Felli, Cristina Forlani e Rosario Giuffrè) circa il ruolo della tecnologia e dell'innovazione all'interno del processo di programmazione, progettazione e produzione delle opere di architettura. Un ruolo certamente oggi pervasivo e trasversale, per molti versi anche strategico, ma non del tutto privo di criticità.

Il Piano Nazionale Industria 4.0, ad esempio, pone molta enfasi sul potenziale delle KETs (*Key Enabling Technologies*) per un significativo aggiornamento del mondo produttivo verso modelli operativi e gestionali più evoluti ed efficienti. Ne è un esempio la digitalizzazione del settore manifatturiero (produzione additiva e stampa 3D) che consente di realizzare prodotti customizzati, anche con morfologie particolarmente complesse, riducendo i tempi e le quantità di materia impiegata e aumentando la sostenibilità della produzione tramite l'utilizzo di biomateriali. Grazie alla robotica, all'intelligenza artificiale, alle nanotecnologie e alla sensoristica digitale, macchinari e sistemi informativi sono sempre più interconnessi e possono comunicare tra di loro, interagendo con l'ambiente circostante e con gli esseri umani (*Internet of Things*, sensoristica digitale, robotica collaborativa, realtà aumentata, *Digital Twins*). L'elaborazione integrata di dati e informazioni (*Big & Meta Data and Analytics*, *Cloud*, sistemi aperti e interoperabili) consente poi il ricorso a modellazioni e simulazioni utili sia in fase predittiva, per meglio comprendere la domanda, per testare i prodotti e ottimizzare i processi a monte della loro attuazione, sia per il monitoraggio delle prestazioni a valle della loro rea-

lizzazione. Nel complesso si tratta di innovazioni che non solo agiscono sui processi produttivi e decisionali, ma che aprono anche alla esplorazione di nuove filiere verticali e orizzontali, rendendo possibili nuove catene del valore (economico, ambientale e sociale).

Nate e sviluppatesi prevalentemente nei contesti più avanzati della produzione industriale, negli ultimi dieci anni le tecnologie cosiddette "abilitanti" hanno trovato molteplici occasioni di trasferimento e applicazione al settore delle costruzioni. E ciò nonostante esso si caratterizza storicamente come un comparto di notevole complessità strutturale, tendenzialmente resistente all'innovazione, per l'eterogeneità delle sue filiere produttive e la varietà dei contesti operativi (dall'ambiente al territorio, alle opere pubbliche per la sanità, le infrastrutture, l'istruzione, la sicurezza, ecc.), per la difficile standardizzazione dei suoi prodotti e delle opere di architettura, e anche per l'articolazione degli attori coinvolti e dei soggetti direttamente o indirettamente interessati dalla sua azione (dallo Stato agli operatori immobiliari, passando per i professionisti, le imprese di costruzione, l'industria di materiali, prodotti e componenti, i soggetti gestori, i fornitori di servizi finanziari e assicurativi, sino agli utenti e ai cittadini) (McKinsey and Company, 2017). Caratteristiche che sono poi particolarmente accentuate nel contesto italiano, connotato da molti limiti nelle capacità programmatiche e nell'efficienza organizzativa e produttiva, con bassi tassi di capitalizzazione e internalizzazione (Mussinelli *et al.*, 2022). Nonostante tutto questo, è certamente possibile registrare una crescente disponibilità di strumenti e tecnologie *hard* e *soft* con funzioni abilitanti che sono entrati a far parte non solo del mondo della ricerca, come dimostrano diversi contributi di

## ENABLING TECHNOLOGIES AND PROJECT QUALITY

The Call for Papers for TECHNE n. 25 arose from an interesting debate developed within the Journal's Editorial Committee and a stimulating discussion with some members of the Scientific Committee (Paolo Felli, Cristina Forlani and Rosario Giuffrè) on the role of technology and innovation within the planning, design and production process of architectural works. A role that today is certainly pervasive and transversal, in many ways even strategic, but with some criticalities. The National Plan Industry 4.0, for instance, places great emphasis on the potential of KETs (*Key Enabling Technologies*) for a significant upgrade of the manufacturing sector towards more advanced and efficient operational and management models. In these terms, the digitisation of the manufacturing sector (additive manufacturing and 3D printing) makes it

possible to produce customised products, even with particularly complex morphologies, reducing the time and quantity of materials used and increasing the sustainability of production using biomaterials. Thanks to robotics, artificial intelligence, nanotechnology and digital sensing, machines and information systems are increasingly interconnected and can communicate with each other, interacting with their surroundings and with humans (*Internet of Things*, digital sensing, collaborative robotics, augmented reality, *Digital Twins*). The integrated processing of data and information (*Big & Meta Data and Analytics*, *Cloud*, open and interoperable systems) then enables the use of modelling and simulations that are useful both in the predictive phase, to better understand demand, to test products and optimise processes upstream of their implementation,

and to monitor performance downstream of their implementation. Overall, these innovations not only impact on production and decision-making processes, but also open up the exploration of new vertical and horizontal supply chains, making new value chains (economic, environmental and social) possible.

Born and developed mainly in the most advanced contexts of industrial production, in the last ten years the so-called "enabling technologies" have been transferred to and applied in the construction sector. A sector of considerable structural complexity, inclined to be resistant to innovation due to the heterogeneity of its production chains and the variety of its operating contexts (from the environment to the territory, to public works for health, infrastructure, education, security, etc.), for the difficult standardisation of its

sperimentazione raccolti in questo numero di TECHNE, ma anche nelle prassi degli operatori di settore. Favoriti anche da una fase di discontinua ma progressiva ripresa del mercato edilizio (dati Istat e Cresme 2021), soprattutto per l'incentivazione dei processi di rigenerazione urbana, le agevolazioni fiscali al recupero e all'efficientamento energetico dell'esistente, e per lo sblocco dei cantieri. Con una notevole crescita delle opere pubbliche derivante dall'impiego delle risorse messe a disposizione tra il 2014 e il 2016 e, più recentemente, dal PNRR.

Un ambito rilevante nel quale la dimensione tecnologica *smart* prospetta importanti ricadute è certamente quello della rigenerazione delle città, con la realizzazione di *digital twin* a scala urbana che possono consentire di modellare scenari trasformativi alternativi e di valutarne ad esempio gli impatti climatico-ambientali, monitorandone poi l'efficacia nelle fasi attuative. Il potenziale derivante dall'intersezione tra l'innovazione portata dalle *Information and Communication Technologies* e gli aspetti ambientali e socioeconomici viene sperimentato anche alla scala dei distretti, in particolare attraverso i modelli dei *Positive Energy Districts* e delle comunità energetiche, e per sostenere la transizione ecologica delle città (produzione energetica *in situ* da fonti rinnovabili, utilizzo di soluzioni basate sulla natura e potenziamento dei servizi ecosistemici, mobilità sostenibile, servizi di prossimità, "città dei 15 minuti"). Lo sviluppo di sistemi avanzati per la conoscenza e la gestione delle informazioni (approcci computazionali e database georeferenziati) prospetta poi notevoli applicazioni per la caratterizzazione dei fattori di esposizione e vulnerabilità dei territori, orientando quindi i processi decisionali alla comprensione, valutazione e mitigazione dei rischi climatici e ambientali.

products and architectural works, as well as for the articulation of the stakeholders involved and directly or indirectly affected by its action (from the State to real estate operators, passing through professionals, construction companies, the materials, products and components industry, management entities, financial and insurance service providers, up to users and citizens) (McKinsey and Company, 2017). These characteristics are then particularly evident in the Italian context, which is characterised by many limitations in planning capabilities and organisational and production efficiency, with low capitalisation and internalisation rates (Mussinelli *et al.*, 2022). In spite of all this, it is certainly possible to record a growing availability of hard and soft tools and technologies with enabling functions that have become part not only of the field of

research, as shown by several experimental contributions collected in this issue of TECHNE, but also in the practices of operators in the sector. They are also favoured by a phase of discontinuous but progressive recovery of the construction market (Istat and Cresme data 2021), mainly due to the encouragement of urban regeneration processes, tax breaks for the recovery and energy efficiency of existing buildings, and the lifting of restraints for construction sites. With a significant growth in public works resulting from the use of the resources made available between 2014 and 2016 and, more recently, by the PNRR.

An important field in which the smart technology dimension has important spin-offs is certainly that of urban regeneration, with the creation of digital twins on an urban scale that can make it possible to model alternative trans-

Analogalemente, alla scala edilizia, la progettazione computazionale consente di gestire architetture di notevole complessità, impiegando sistemi informativi e interfacce digitali per la modellazione e realizzazione di architetture responsive il cui comportamento energetico e ambientale può essere simulato e poi verificato monitorando una considerevole quantità di dati e informazioni. Con applicazioni trasferibili anche al comparto della riqualificazione, del *retrofit* energetico e della valorizzazione del patrimonio esistente (*smart environment* per i centri e i borghi storici, l'edilizia sociale, i beni culturali, ecc.).

Da un lato quindi queste applicazioni sono finalizzate a supportare scelte progettuali improntate a una logica esigenziale e prestazionale più attenta ai caratteri della domanda, in grado di conformare ambienti responsivi capaci di adattarsi alle necessità dell'utenza (approccio *user-based/centered*), ma anche di favorire comportamenti virtuosi e buone pratiche d'uso (*proactive behaviour*). Possono inoltre contribuire in modo significativo a sostenere la transizione del comparto edilizio (materiali, prodotti, componenti e sistemi) verso modelli circolari ambientalmente ed economicamente più sostenibili. E, non da ultimo, rendere i processi decisionali della Pubblica Amministrazione più efficaci, più partecipati e maggiormente condivisi con le comunità interessate.

Dall'altro vanno però delineandosi alcuni scenari critici che investono sia la figura del progettista, sia i caratteri del paesaggio urbano e l'immagine dell'architettura. In primo luogo, occorre rilevare come al frequente richiamo al cambiamento culturale richiesto se non imposto dalle KETs non sia corrisposta una adeguata valutazione delle trasformazioni che esse hanno già determinato, con effetti anche discutibili, soprattutto nel loro

formation scenarios and assess, for example, their climatic-environmental impacts, then monitoring their effectiveness in the implementation phases. The potential of the intersection between innovation promoted by Information and Communication Technologies and environmental and socio-economic aspects is also being tested at the district scale, in particular through the models of Positive Energy Districts and energy communities, and to support the ecological transition of cities (*in-situ* energy production from renewable sources, use of nature-based solutions and enhancement of ecosystem services, sustainable mobility, neighbourhood services, "15-minute cities"). The development of advanced systems for knowledge and information management (computational approaches and geo-referenced databases) then envisages considerable

applications for the characterisation of the exposure and vulnerability factors of territories, thus orienting decision-making processes towards the understanding, assessment and mitigation of climate and environmental risks.

Similarly, at the building scale, computational design makes it possible to manage architectures of considerable complexity, using information systems and digital interfaces for the modelling and realisation of responsive architectures, whose energy and environmental behaviour can be simulated and then verified by monitoring a considerable amount of data and information. With applications that can also be transferred to the redevelopment, energy retrofit and enhancement of existing built heritage (*smart environment* for historical centres and villages, social housing, cultural heritage, etc.). On the one hand, therefore, these ap-

trasferimento ad ambiti particolarmente complessi e delicati quali quelli del progetto di architettura, del governo delle trasformazioni urbane e territoriali, e più in generale della modifica- cazione dell'ambiente costruito.

Come già è avvenuto nel passato con altri apparati strumentali innovativi (quali ad esempio il CAD o il GIS) che hanno contribu- ito a efficientare il processo progettuale, alla conoscenza e all'uso delle nuove tecnologie non sempre si accompagna una adeguata consapevolezza critica circa le loro ricadute sulla configurazione formale e fisica degli ambienti di vita, nonché sulle loro qualità funzionali e fruibile. Anche per la forbice che si è ormai aperta tra la rapidità del cambiamento e i tempi lunghi dell'architettura, e per i limiti fisiologici delle capacità di apprendimento e adatta- mento individuale e sociale. Parafrasando la nota affermazione di Marshall McLuhan "the medium is the message" (McLuhan, 1964), è la stessa struttura delle KETs, nella loro vastissima decli- nazione, a influenzare profondamente, ben oltre il loro specifico utilizzo strumentale, le modalità di agire ma anche di pensare di tutti gli attori del processo: progettisti, committenti, imprendito- ri, produttori e utenti finali delle opere di architettura.

Diverse ricerche evidenziano peraltro come una parte non mar- ginale del mondo produttivo non si senta ancora adeguatamente preparata ad affrontare la sfida delle tecnologie 4.0, e anche a livello delle pubbliche amministrazioni si palesano resis- tenze all'implementazione di modelli e sistemi di pianificazione *smart* che possono prestare il fianco a derive produttivistiche quando non tecnocratiche. Basti ricordare il dibattito sulle ICT applicate al lavoro e alla formazione a distanza, dei quali ab- biamo recentemente sperimentato tutti gli effetti, positivi, ma anche negativi, durante fase acuta della pandemia Covid.

lications are aimed at supporting design choices based on a demanding and performance rationale that is more attentive to the characteristics of the demand, capable of shaping responsive environments and of adapting to the needs of users (user-based/centred approach), as well as of encouraging virtuous behaviour and good practices of use (proactive behaviour). They can also significantly contribute to supporting the transition of the building sector (materials, products, components and systems) towards more environmentally and economically sustainable circular models. And, last but not least, they can make Public Administration decision-making processes more effective, more participatory and more shared with the communities concerned.

On the other hand, however, a num- ber of critical scenarios are emerging

that affect the figure of the designer, the character of the urban landscape, and the image of architecture. Firstly, it should be noted how the frequent call for the cultural change required, if not imposed, by the KETs has not been matched by an adequate assessment of the transformations they have already brought about, with even questionable effects, especially in their transfer to particularly complex and delicate spheres such as those of architectural design, the governance of urban and territorial transformations and, more generally, the modification of the built environment.

As already happened in the past with other innovative instrumental apparatuses (such as CAD or GIS) that have contributed to making the design process more efficient, the knowledge and use of new technologies is not always accompanied by an adequate critical

Nel rispondere agli stimoli proposti dalla Call, sono soprattutto i contributi del Dossier, quelli di Nicola Emery e Paolo Tombesi in primis, e alcuni saggi a rilevare una sorta di irriducibilità della complessità del fenomeno architettonico, e contestualmente anche dell'atto progettuale, rispetto agli approcci tendenzialmente deterministici e alle logiche di tipo deduttivo, stocastico e probabilistico sui quali si fonda l'intelligenza artificiale: sottolineando ad esempio la variabilità e le peculiarità di ogni contesto intervento e, più estesamente, il carattere spesso indeterminato, quando non ambiguo, della stessa realtà che ci circonda. Certamente è possibile rilevare esiti interessanti in alcune sperimentazioni tecniche rivolte alla ottimizzazione prestazionale delle città e degli edifici negli ambiti dell'efficien- tamento energetico, della progettazione strutturale e anche della ricerca formale. Ma in questi ambiti, spesso specialistici, l'applicazione di modelli algoritmici porta spesso a enfatizzare - anche attraverso il gesto architettonico - il potenziale con- seguimento di performance elevatissime: altresì prospettando standard che vanno ben oltre le reali necessità, salvo poi omettere ogni verifica *ex post* circa le effettive prestazioni ottenute dall'opera realizzata, così come una valutazione realistica della sostenibilità tecnica ed economica di un trasferimento diffuso delle soluzioni proposte.

Alla diffusione dell'innovazione dovrebbe invece accompa- gnarsi l'impiego sistematico delle pratiche di monitoraggio, per verificare se tali applicazioni conseguono realmente gli obiet- tivi che le hanno generate: ovvero migliorare la qualità e la so- stenibilità dell'ambiente, dei prodotti, dei servizi e delle opere di architettura, ottimizzare i processi decisionali e renderli più efficaci e condivisi, facilitando la produzione, la trasmissione e

awareness of their effects on the formal and physical configuration of living environments, as well as on their functional qualities. This is also due to the gap that has now opened up between the rapidity of change and the long lead times of architecture, and to the physiological limits of individual and social learning and adaptation capacities. Paraphrasing Marshall McLuhan's well-known affirmation "the medium is the message" (McLuhan, 1964), it is the same structure of KETs, in their vast declination, that profoundly influences, beyond their specific instru- mental use, the ways of acting but also of thinking of all the actors in the process: designers, clients, entrepreneurs, producers and end users of architec- tural works.

Moreover, various studies show how a significant part of the productive world does not yet feel adequately

prepared to face the challenge of 4.0 technologies, and even at the level of public administrations there is resistance to the implementation of smart planning models and systems that can lend themselves to productivist, if not technocratic, drifts. Suffice it to recall the debate on ICTs applied to work and distance learning, of which we have recently experienced all the effects, both positive and negative, during the acute phase of the Covid-19 pandemic. In responding to the stimuli proposed by the Call, the contributions in the Dossier, firstly those of Nicola Emery and Paolo Tombesi, and some essays reveal a sort of irreducibility of the complexity of the architectural phe- nomenon as well as of the design act, with respect to the deterministic ap- proaches and the deductive, stochastic and probabilistic rationale on which artificial intelligence is based. Em-

l'accessibilità delle conoscenze, e incrementando i livelli di salute e benessere a fasce sempre più ampie di popolazione. O se, viceversa, non finiscono per consolidare la tendenza a costruire paesaggi de-culturali, globalizzati e standardizzati, come avviene laddove un certo modo di farsi paladini dell'ambiente e dell'innovazione, per avere successo, si affida a protagonisti capaci di produrre virtuosismi che enfatizzano la tecnologia come elemento di spettacolarizzazione del fenomeno architettonico. Anche con le ricorrenti banalizzazioni e i falsi messaggi, pur ammantati di erudizione, che consentono di ottenere facili consensi nella comunicazione dei mass-media e, purtroppo, talvolta anche in quella scientifica. Ma ciò che è di moda non garantisce quasi mai la qualità, così come ciò che vale non è quasi mai frutto di clamore, ma più spesso di stile, misura e discrezione, tanto più necessari in un'epoca difficile quale quella che stiamo vivendo.

La continua dilatazione dei limiti di quanto è reso possibile dall'innovazione tecnologica conduce a esiti contraddittori, a volte anche insensati, utili più a validare autoreferenzialmente il successo dei mezzi tecnici utilizzati che non a garantire della loro effettiva rispondenza alla domanda sociale. Ed è certamente difficile stabilire il confine che separa la tecnologia intesa e impiegata per il suo ruolo strumentale, quel ruolo che nella Call abbiamo appunto definito "abilitante", da forme spinte di automazione dei processi decisionali, improntate a logiche deterministiche *data driven* e da algoritmi in grado di generare in modo meccanico forme, immagini e soluzioni tecniche.

Ma altrettanto certamente emergono derive nelle quali l'occhio della tecnica tende a sostituirsi allo sguardo dell'uomo, indebolendo il portato percettivo della sua esperienza personale e

phasing, for example, the variability and peculiarities of each intervention context and, more extensively, the often indeterminate, when not ambiguous, character of the same reality that surrounds us. It is certainly possible to detect interesting results in certain technical experiments aimed at the performance optimisation of cities and buildings in the fields of energy efficiency, structural design and even formal research. But in these often specialised fields, the application of algorithmic models often leads to emphasising – even through the architectural gesture – the potential achievement of very high performance: also by proposing standards that go far beyond the real needs, but then omitting any ex-post verification of the actual performance achieved by the work implemented, as well as a realistic assessment of the technical and economic

sustainability of a widespread transfer of the proposed solutions. The dissemination of innovation should, instead, be accompanied by the systematic use of monitoring practices, to verify whether these applications really achieve the objectives that generated them: that is, improving the quality and sustainability of the environment, products, services and architectural works, optimising decision-making processes and making them more effective and shared, facilitating the production, transmission and accessibility of knowledge, and increasing the levels of health and well-being of ever larger segments of the population. Or whether, on the contrary, they do not end up consolidating the tendency to build de-cultural, globalised and standardised landscapes, as happens where a certain way of championing the environment and innovation, in

collettiva, anche per la spinta alla specializzazione estrema che invade tutti gli ambiti del piano e del progetto, cui consegue una visione parziale e tendenzialmente segmentata dei problemi. Come ben sottolinea Andrea Giachetta, poco ci si interroga, e sempre meno vi è consapevolezza, circa le abilità necessarie per svolgere un'attività progettuale e la grande varietà di percorsi cognitivi (imitativi, combinatori, associativi, analogici, metaforici, dissociativi, disgiuntivi, ibridatori, narrativi, diagrammatici, ecc.) che alimentano la capacità interpretativa della complessità del reale e il correlato potenziale prefigurativo del progetto. Fidando nell'efficienza della risposta tecnica specializzata, sempre meno coltiviamo ed esercitiamo le nostre capacità di osservazione e percezione attraverso l'esperienza diretta dei luoghi e delle cose, capacità invece determinanti per la loro comprensione e per la prefigurazione del progetto attraverso immagini mentali (e non solo attraverso render più o meno ingannevoli o fotorealistici). "Forse proprio per la loro imprecisione iniziale, per la loro indefinita malleabilità e capacità trasfigurativa e di richiamo di ricordi e vissuti, le immagini mentali hanno una ricchezza e possono avere un'importanza così grande che mi pare proprio impossibile trascurarne le potenzialità in fase progettuale. È quello che, invece, sistematicamente avviene, dato che il loro ruolo è pressocché (e incredibilmente) misconosciuto nelle teorie del progetto e, peggio ancora, nella pratica del suo insegnamento." (Giachetta, 2022).

Per leggere e comprendere i luoghi, e quindi per trasformarli in modo sostenibile e rispettoso, occorre allora coniugare efficacemente il portato della tecnologia, che storicamente l'innovazione non ha mai mancato di fornire ai progettisti, con quella capacità di richiamare e rielaborare il proprio vissuto multisen-

order to succeed, relies on protagonists capable of producing virtuosities that emphasise technology as a factor that turns the architectural phenomenon into a show. Even with the recurring trivialisations and false messages, albeit cloaked in erudition, that allow for easy consensus in mass media communication and, unfortunately, sometimes in scientific communication as well. But what is fashionable almost never guarantees quality, just as what is valuable is almost never the result of clamour, but more often of style, measure and discretion, all the more necessary in a difficult era such as the one in which we are living. The continuous expansion of the limits of what is made possible by technological innovation leads to contradictory outcomes, sometimes even unreasonable, useful more to self-referentially validate the success of the technical

means used than to guarantee their effective response to social demand. And it is certainly difficult to establish the boundary that separates technology conceived and applied for its instrumental role, the role that in the Call we have defined as 'enabling', from driven forms of automation of decision-making processes, marked by a deterministic data-driven rationale, and algorithms capable of mechanically generating forms, images and technical solutions.

Likewise, there are drifts in which the eye of technology tends to replace the human eye, weakening the perceptive capacity of personal and collective experience, also due to the drive towards extreme specialisation that invests all areas of planning and design, resulting in a partial and tendentiously segmented vision of problems. As Andrea Giachetta rightly emphasises, there is little

soriale, individuale e sociale. Un approccio molto lontano da quelli oggi ricorrenti, tutti tesi a lasciare un segno o una firma, sino a ricorrere alla stravaganza pur di rincorrere, se non l'innovazione, almeno la novità.

Un approccio invece sensibile e responsabile, possibile e necessario, se non indispensabile soprattutto in contesti quali quelli italiano ed europeo, dove la qualità dei luoghi e il loro valore sono fatti prevalentemente dall'emergere di stimoli antichi, dell'emozione di cose che vengono da lontano, da spazi e architetture disposti da mani veramente intelligenti.

#### REFERENCES

- AA.VV. (2017), *Reinventing Construction through a productivity revolution*, McKinsey Global Institute.
- Cresme (2021), *XXXI rapporto congiunturale e previsionale sul mondo delle costruzioni*.
- Giachetta A. (2022), *Architettura e immagini mentali. Processi cognitivi per il progetto dello spazio costruibile nell'era della complessità*, Franco Angeli.
- McLuhan M. (1964), *Gli strumenti del comunicare*, Il Saggiatore.
- Mussinelli E., Schiaffonati F. and Torricelli M.C. (2022), "Per un cambiamento necessario/For a necessary change", *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 23, pp. 15-20.

question, and decreasing awareness, of the skills needed to carry out a design activity and the great variety of cognitive pathways (imitative, combinatory, associative, analogical, metaphorical, dissociative, disjunctive, hybridising, narrative, diagrammatic, etc.) that feed the interpretative capacity of the complex reality and the correlated prefigurative potential of the project. Trusting in the efficiency of the specialised technical response, we scarcely cultivate and exercise our observation and perception skills through direct experience of places and things, abilities that are, instead, decisive for their comprehension and for the prefiguration of the project through mental images (and not only through more or less deceptive or photorealistic renderings). "Perhaps precisely because of their initial imprecision, their indefinite malleability and transfigurative

capacity to recall memories and experiences, mental images have such a richness and can be so important that it seems to me impossible to overlook their potential in the design phase. This is what, instead, systematically happens, given that their role is almost (and incredibly) misunderstood in the theories of design and, even worse, in the practice of its teaching" (Giachetta, 2022).

In order to read and understand places, and thus to transform them in a sustainable and respectful manner, it is, therefore, necessary to effectively combine the technological contribution, which historically innovation has never failed to provide designers with, along with the capacity to recall and rework one's own multi-sensory, individual and social experience. An approach far removed from those recurring today, aimed at leaving a

mark or a signature, even resorting to extravagance in order to chase, if not innovation, at least novelty.

Instead, it is a sensitive and responsible approach, one that is possible and necessary, if not indispensable, especially in contexts such as those in Italy and Europe, where the quality of places and their value are mainly made up of the emergence of ancient stimuli, of the emotion of things that come from far away, of spaces and architectures arranged by truly intelligent hands.

Filippo Angelucci<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-2042-7808>

Pietromaria Davoli<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1268-4713>

<sup>1</sup> Dipartimento di Architettura, Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara, Italia

filippo.angelucci@unich.it  
pietromaria.davoli@unife.it

### Avere, Abitare, Abilitare

Nell'avviare una riflessione sui ruoli abilitanti che le tecnologie possono assumere nella progettazione dell'habitat antropizzato, è utile evidenziare una questione di ordine terminologico, riguardante i verbi avere, abitare e abilitare. Essi condividono una stessa radice etimologica. Il verbo avere (dal latino *habere*), se nell'accezione corrente rimanda all'esclusiva idea di 'possedere', contiene in realtà elementi comuni con il verbo essere, a cui spesso è contrapposto. In molte lingue, avere significa anche "avere un certo modo di essere" (Virno, 2019; Agamben, 2019) e quindi, disporre di capacità e abitudini che pongono un soggetto in specifiche condizioni di essente. Abitare (iterativo di *habeo*), contiene la stessa radice di *habitus* (modo di essere), di *habitudo* (modo di comportarsi), ma anche di *habilis* (capace di compiere determinate azioni) da cui deriva il verbo abilitare. Nell'uso comune, i tre verbi sono utilizzati per indicare distinte attività, ma sono invece molto più profondamente legati. Essi confermano una connessione fra l'essere umano e la sua necessità di abitare, modellando il proprio spazio vitale, assumendo determinati comportamenti, ricorrendo alle tecniche per rimediare alle proprie carenze biologiche di adattamento (Galimberti, 1999; Severino, 2021). È intorno al trinomio avere, abitare e abilitare che probabilmente deve essere individuato il nucleo centrale dell'indagine sul ruolo abilitante della tecnologia nel prendere decisioni, generare spazi abitabili e usare in modo ragionevole le risorse nella progettazione dell'Architettura.

### ENABLING VARIATIONS AND DIMENSIONS OF TECHNOLOGY IN ARCHITECTURE: A COMPLEX DEBATE

#### "Have", "inhabit", "enable"

It is useful to highlight a terminological question concerning the verbs "have", "inhabit", and "enable" towards a starting reflection on the enabling roles that technologies can play in the design of anthropised habitat. They share the same etymological root. The verb "have" (from Latin *habere*), actually contains elements in common with the verb "be", it is often opposed to, even if it refers to the exclusive idea of possessing in the current meaning. In several languages, "have" also means that "you have a certain way of being" (Virno, 2019; Agamben, 2019) and, therefore, you have skills and habits that put yourself in specific conditions of being. The verb "inhabit" (iterative of *habeo*), has got the same root as both *habitus* (way of being), and *habitudo* (way of behaving), and *habilis* (able to do certain actions),

### Tecnologie abilitanti: una definizione ancora incompleta

La necessità di individuare alcuni segmenti tecnologici come "abilitanti" evidenzia una questione ancora parzialmente irrisolta. Da un lato, si sottolinea che alcuni rami dello sviluppo tecnologico assumono l'esclusiva potenzialità di abilitare nuovi processi, atteggiamenti, capacità intellettive e applicative. Nello stesso tempo, sembra che tutto quanto abbia caratterizzato, finora, l'uso delle tecniche e le loro dinamiche di cambiamento sia archiviabile in un passato anacronistico e irrimediabilmente insostenibile. Il concetto di tecnologia abilitante ha di certo contribuito ad alimentare questo discostamento. La prima definizione elaborata nella Comunità Europea per le *Key-Enabling Technologies* (KETs) si è concentrata sull'individuazione di alcuni assi tecnologici portanti corrispondenti alle principali esigenze suggerite dai Paesi membri UE (EU-COM, 2009). Si è così delineato il primo riconosciuto elenco di KETs: *advanced materials, nanotechnology, micro/nanoelectronics, industrial biotechnology, photonics*. Definite tecnologie di rilevanza sistemica e multidisciplinare, esse erano considerate strategicamente prioritarie per l'innovazione di processi, beni e servizi perché caratterizzate da alta intensità di conoscenza, ricerca e sviluppo, rapidi cicli d'innovazione ed elevati costi d'investimento.

Questa definizione di KETs soffriva di un'eccessiva visione tecnocratica, per settori, prodotti e oggetti e non dava conto di tanti altri segmenti tecnologici che furono semplicemente esclusi dal possedere capacità abilitanti. La prima generazione di KETs risentiva anche dell'elevata variabilità dei mercati finanziari e in-

from which the verb "enable" derives. In common usage, the three verbs are used to indicate different activities, but they are much more deeply linked with one another. They confirm a connection between the human being and his need to inhabit, by modelling his own living space, assuming certain behaviours, using techniques to remedy his own biological deficiencies of adaptation (Galimberti, 1999; Severino, 2021). It is around the trinomial "have, inhabit, enable" that the core of our investigation should probably be identified on the enabling role of technology to make decisions, create living spaces, and reasonably use resources in design of Architecture.

#### Enabling technologies: as yet an incomplete definition

The need to identify some "enabling" technological segments highlights a

still partially unsolved question. It is underlined that some branches of technological development have the exclusive potentiality of enabling new processes, attitudes, intellectual and application capabilities. At the same time, it seems that what has characterised the use of techniques and their dynamics of change up to now can be archived in an anachronistic and irreparably unsustainable past time.

The concept of enabling technology has certainly contributed to fuelling this gap. The first definition elaborated in the European Community for *Key-Enabling Technologies* (KETs) focused on the identification of some supporting technological axes, corresponding to the main needs suggested by the EU member countries (EU-COM, 2009). So, the first recognised list of KETs was outlined: *advanced materials, nanotechnology, micro/nanoelectronics,*

dustriali che inducono continue rimodulazioni dei settori della produzione. Non per caso, a soli dieci anni dal primo documento EU, le KETs appaiono già sensibilmente riorientate e, in parte, aggregate in nuove categorie di classificazione. In questa seconda stagione, si osserva un tendenziale posizionamento trasversale e portante di alcuni settori (AI, micro/nano-elettronica, fotonica, sicurezza e connettività) rispetto ad altri più specialistici, ma portati (STOA, 2021). Nella stessa direzione, il Piano Nazionale Impresa 4.0, che sviluppa i contenuti del Piano Nazionale Industria 4.0 del 2016, amplia la definizione comunitaria di KETs prediligendo comunque gli aspetti della digitalizzazione.

Non sorprende che il dibattito e la sperimentazione sulle tecnologie abilitanti abbia interferito debolmente nel campo dell'Architettura e forse anche in termini di ricadute nell'ambito del progetto. Laddove si sono delineate prospettive di innovazione connotate da tempi particolarmente veloci, si contrappongono quegli aspetti dell'Architettura caratterizzati, storicamente, da cronologie prolungate di cambiamento e forme di ibridazione tecnica (Nardi, 2000). Rispetto alle attitudini comportamentali di persone e società, alle forme dell'abitare individuali e collettive, alla domanda di architetture che possono abilitare nuove condizioni di benessere senza negare completamente il passato, il trinomio avere (essere), abitare, abilitare dovrà essere indagato considerando anche altre dimensioni.

#### **Quali altre dimensioni abilitanti per la tecnologia?**

come nel campo dell'architettura sia oggi necessario superare

Per andare oltre le limitative definizioni tecniche e normative di tecnologia abilitante, finora riassunte, appare evidente

*industrial biotechnology*, and *photronics*. They were defined as multidisciplinary technologies of systemic relevance; they were considered as strategic priorities for the innovation of processes, goods, and services because they were characterised by high knowledge intensity, research and development, rapid innovation cycles and high investment costs.

This definition of KETs suffered from an excessive technocratic vision for sectors, products, and objects, and it did not consider many other technological segments that were simply excluded from possessing enabling capabilities. The first generation of KETs was also affected by the high variability of the financial and industrial markets, which lead to continuous remodulations of the production sectors. Not by chance, just ten years after the first EU document, the KETs already appear

significantly reoriented and, partly aggregated into new classification categories. In this second period, there is a transversal and supporting positioning trend of some sectors (AI, micro/nano-electronics, photonics, security, and connectivity) compared to other more specialised but supported sectors (STOA, 2021). The *Piano Nazionale Impresa 4.0*, developing the contents of the *Piano Nazionale Industria 4.0* in 2016, expands the Community definition of KETs in the same direction, and prefers the aspects of digitalisation, anyway.

It is not surprising that the debate and experimentation about enabling technologies has interfered weakly in the architectural sector and, perhaps, also in terms of repercussions within the design. Innovation perspectives, characterised by particularly rapid times, have emerged contrasting those

l'idea di "tecnologia di servizio". La tecnologia, infatti, può assumere un ruolo abilitante se sarà in grado di pervadere, 'a monte e attraverso' e non necessariamente 'a valle', l'intero processo progettuale e costruttivo, indirizzandone le traiettorie innovative non solo in senso tecnico o estetico.

In questa direzione, può essere utile ripartire dal concetto di "metatecnologia", nell'accezione di sistema di risorse conoscitive e tecniche che si pongono come *media*, in senso regolativo, "tra" entità dell'ambiente naturale e umano, fra umanità e tecnologia e, si potrebbe aggiungere oggi, anche fra tecnologia e tecnologia (Floridi, 2017). Si tratta quindi di riavvicinare *logos* e *techne*, ricomponendo diverse conoscenze e saperi applicativi che possono abilitare progettisti e abitanti a una visione processuale, sistematica e integrata dell'agire tecnico. Una tecnologia che quindi abilita perché sviluppa capacità di anticipazione per "prevenire, limitare, rimediare, compensare" e ottimizzare.

È però importante soffermarsi sulla tecnologia che non solo anticipa o risolve problemi, ma che contribuisce anche alla ricerca continua di stati multipli di adattività co-evolutiva fra *bios* e *techne*. Entra così in gioco una pratica tecnologica non distinta dalle capacità evolutive comportamentali, culturali e abitative che sono fondamentali nei processi di preadattamento della specie umana a fronte delle sfide ambientali e sociali. La tecnologia assume valenza abilitante per definire scenari, strategie e scelte che supportino le necessità evolutive dell'*homo complexus* per prendersi cura di sé, dell'ambiente, degli altri, per apprendere e collegare logiche diverse, per affrontare le incertezze (Ceruti and Bellusci, 2020).

La necessità di una tecnologia che abilita su più livelli emerge anche dai contributi selezionati per *Techne 25*. Si riscontra

aspects of Architecture historically featuring prolonged chronologies of change and forms of technical hybridisation (Nardi, 2000). The trinomial "have (be), inhabit, enable" shall be investigated also considering other dimensions, compared to people and society's behavioural attitudes, individual and collective ways of living, and demands for architectures that can enable new comfort conditions without completely denying the past times.

#### **What are the other enabling dimensions for technology?**

It is evident that now it is necessary to overcome the idea of "service technology" in the architectural sector to reach beyond the limiting technical and regulatory definitions of enabling technology summarised so far. In fact, technology may play an enabling role if it is able to pervade the whole design

and construction process, 'upstream and throughout', and not necessarily 'downstream', orienting its innovative trajectories, not only in a technical or an aesthetic sense.

In such a direction, it may be useful restarting from the concept of "metatechnology", as a system of cognitive and technical resources acting as *media*, in a regulatory sense, "among" entities of both natural and human environment, between humanity and technology and, we could add today, between technology and technology, too (Floridi, 2017). It is, therefore, a question of getting *logos* and *techne* closer, recomposing different applied knowledge that can enable designers and inhabitants to a procedural, systemic, and integrated vision of technical action. So, it is an enabling technology because it develops anticipatory skills in order to prevent, limit,

un'ancora marcata tendenza nel considerare soprattutto le tecnologie digitali. Si possono però rilevare almeno altre tre dimensioni d'indagine.

In primo luogo, si rileva l'urgenza di interrompere l'accumulazione ipertrofica di oggetti e prestazioni che si stratificano asetticamente sullo spazio abitativo. All'"avere", nel senso possessivo enunciato da Fromm (Fromm, 1976), è necessario contrapporre una visione che torni a riflettere sulle implicazioni che le tecniche comportano nell'"abitabilizzare" lo spazio per sopravvivere (Friedman, 2003), ma non solo. Andrebbe estesa la definizione stessa di tecnologia espressa dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2001), senza limitarla al campo delle disabilità, ma ampliandola a qualsiasi prodotto, strumento o sistema che possa contribuire all'*empowerment* delle persone e delle loro capacità.

Un altro aspetto emergente riguarda le dimensioni abilitanti che si possono attivare nell'evoluzione delle forme di creatività e di sviluppo culturale attraverso tecnologie che non perdono di vista le variabili umane e allo stesso tempo ambientali. In questa seconda traiettoria, vanno esplorati sia i ruoli abilitanti che le tecnologie possono assumere in vista degli obiettivi di sostenibilità dell'Agenda 2030 (ONU, 2015), sia le forme di applicazione, diffusione e trasferimento tecnologici che, nei recenti orientamenti dell'IPCC, sono in grado di abilitare "condizioni" per migliorare la fattibilità delle opzioni di adattamento e mitigazione e affrontare il *climate change* (IPCC, 2022). A questi campi di esplorazione si affiancano anche gli ambiti di ricerca e innovazione del PNR – Programma Nazionale per la Ricerca 2021/27, riguardanti i *design studies*, i cambiamenti climatici, la qualità della vita e le strategie di rigenerazione dell'habitat antropizzato (MUR, 2020).

remedy, balance and optimise.

However, it is important to focus on the technology that not only anticipates or solves problems, but which also contributes to the continuous search for multiple states of co-evolutionary adaptivity between *bios* and *techne*. So, a technological practice comes into play, which is not different from the behavioural, cultural, and housing evolutionary capabilities that are essential in the pre-adaptation processes of the human species before environmental and social challenges. Technology has got an enabling value to define scenarios, strategies and choices supporting the evolutionary needs of the *homo complexus* to take care of himself, the environment and the others, to learn and connect different rational approaches, and face uncertainties (Ceruti and Bellusci, 2020). The need for an enabling technology

at several levels also emerges from the contributions selected for *Techne 25*. There is still a marked tendency to consider mainly digital technologies. However, at least three other dimensions of investigation can be identified. Firstly, there is an urgent need to interrupt the hypertrophic accumulation of objects and performances that are aseptically stratified on the living space. It is necessary to oppose "have" in the possessive sense stated by Fromm (Fromm, 1976) against a vision, which once again reflects on the technical implications involved in the "habitabilisation" of the space to survive (Friedman, 2003), and that is not all. The definition of technology itself expressed by the World Health Organisation (WHO, 2001) should be extended to any product, tool or system that may contribute to people *empowerment* and their capabilities,

Ulteriori dimensioni abilitanti risultano inoltre dai recenti dispositivi legislativi e strategici comunitari e nazionali. Tra questi, vanno ricordati il *NextGenerationEU Plan* con cui sono stati finanziati i piani nazionali (il PNRR in Italia) e il documento per un'*Industria 5.0* europea. Rispetto alle perimetrazioni specialistiche delle KET's, infatti, il *NextGenerationEU* amplia gli ambiti d'innovazione tecnologica abilitante entro missioni trasversali che pervadono gli aspetti quotidiani dell'abitare: digitalizzazione, transizione ecologica, infrastrutture sostenibili, istruzione e ricerca, inclusione e coesione, salute. Per quanto riguarda l'*Industria 5.0*, invece, sono le stesse tecnologie abilitanti a essere ridefinite in senso *human-centred*, individuando come future sfide le interazioni uomo-macchina, le interferenze fra *Big Data* e società, l'interoperabilità fra sistemi tecnologici complessi e le loro implicazioni di natura energetica.

#### **Declinazioni per una tecnologia che abilita**

Da queste riflessioni generali, terminologiche e concettuali, è sorta la necessità di approfondire il tema del ruolo abilitante della tecnologia anche con l'apporto di alcuni studiosi che si stanno confrontando direttamente con le molteplici sfide poste dalle innovazioni tecnologiche contemporanee rispetto alle complessità del fare Architettura.

I contributi di Nicola Emery, Maurizio Ferraris e Paolo Tombesi, coinvolti per la costruzione di questo dossier, evidenziano quanto, in realtà, il tema sia da leggersi non soltanto dal punto di vista tecnico, costruttivo e operativo. Emerge uno scenario molto più complesso che riguarda gli aspetti teorетici, antropologici e metodologici indotti dal concetto di tecnologia che

and it should not be limited to the disability field.

Another emerging aspect concerns the enabling dimensions, which can be activated in the evolution of the forms of creativity and cultural development through technologies that do not overlook both human and environmental variables. In this second trajectory, we must explore the enabling roles technologies can assume considering the sustainable development goals of the 2030 Agenda (ONU, 2015). We must also explore the forms of technological application, diffusion, and transfer, which can enable some "conditions" to improve the feasibility of adaptation and mitigation options, and face the *climate change* (IPCC, 2022), in the recent guidelines of the IPCC. These fields of exploration are also supported by the research and innovation fields of the Italian PNR – Programma Nazion-

ale per la Ricerca 2021/27, concerning *design studies*, climate change, quality of life and regeneration strategies of the anthropised habitat (MUR, 2020). Further enabling dimensions also result from the recent Community and National legislative and strategic guidelines. The *NextGenerationEU Plan*, the National plans were financed with (the PNRR in Italy), and the document for a *European Industry 5.0* should be mentioned among them. Compared to the specialised boundaries of the KETs, in fact, the *NextGenerationEU* extends the areas of enabling technological innovation within transversal missions that pervade the aspects of daily living: digitalisation, ecological transition, sustainable infrastructures, education and research, inclusion and cohesion, and health. Concerning *Industria 5.0*, the enabling technologies themselves are redefined

può assumere capacità abilitanti all'interno dell'intero processo progettuale dell'habitat umano.

Nicola Emery precisa che, prima ancora di parlare di tecnologie abilitanti, sarebbe necessario disinnescare quel "rapporto ingenuo" che tende a stabilirsi tra la "forza" dei metodi tecnologici, l'espansione incontrollata dei processi di automatizzazione e l'illusione di una facilitazione che esonera l'umanità da tutte le gravosità del lavoro. Nella trasformazione profonda dei ragionamenti teleologici sull'avanzare delle innovazioni tecnologiche, l'inversione tra soggetto e oggetto, tra l'umanità e le tecniche, sarebbe alla base di questa ingenuità che Emery metaforicamente evidenzia evocando l'immagine dell'apprendista stregone. Con il progressivo svanire del mito moderno della tecnica liberatoria al servizio della società, gli enti tecnologici oggi retroagiscono con i soggetti umani monitorandoli, orientandoli, guidandoli, ma anche possedendoli e sovrastandoli con un'imposizione di regole, tempi, ritmi e processualità del mondo virtuale.

In assenza di una ricucitura fra il pensiero umanistico e quello scientifico, che abbia la capacità di riequilibrare i rapporti fra attori, processi, mezzi e fini, risulta difficile, se non inutile, affrontare questioni che riguardano la sfera dell'abitare e del costruire quali: la disautomatizzazione dei processi, il superamento delle derive tecnocratiche, la revisione disciplinare e la rifondazione dei paradigmi del progetto. In sostanza, senza il superamento della dilagante "teleologia dell'utile immanente", andrebbe a decadere anche la possibilità di ripensare in senso davvero sostenibile e umanizzato il progetto dell'architettura, a meno di non rifugiarsi in un'illusoria e consolante riproposizione della sua assoluta centralità nel dominio del costruire

in a *human-centred* sense, identifying human-machine interactions, interferences between *Big Data* and society, interoperability among complex technological systems and their energy implications as future challenges.

**Variations for an enabling technology**  
Starting from these general, terminological, and conceptual reflections, it has been necessary to investigate the issue of the enabling role of technology with the contribution of some researchers, too. They are directly facing the multiple challenges, made by contemporary technological innovations, with respect to the complexities of making Architecture.

The contributions from Nicola Emery, Maurizio Ferraris, and Paolo Tombesi, involved in making this dossier, highlight how the issue is to be read not only from a technical, construction

and operational point of view. A much more complex scenario emerges concerning the theoretical, anthropological, and methodological aspects, which are induced by the concept of technology, and which can have different enabling capabilities within the whole design process of the human habitat. Nicola Emery specifies that, even before talking about enabling technologies, it would be necessary to diminish that "naïve relationship" established among the "power" of technological methods, the uncontrolled expansion of automation processes, and the illusion of a facilitation, which emancipates humanity from all the burdens of work. In the deep transformation of a teleological thought about the advances of technological innovations, the inversion between subject and object, between humanity and techniques, would be at the basis of this naivety

il nostro habitat. Con questo potenziale stallo dell'evoluzione del progetto e delle implicazioni a esso legate, andrebbe a sanarsi anche una sua definitiva inadeguatezza per affrontare le emergenze abitative e planetarie contemporanee e del futuro. Anche le innovazioni tecnologiche e le loro capacità di svolgere un ruolo abilitante per l'umanità sarebbero inesorabilmente destinate a continuare ad assumere un carattere esclusivamente prestazionale e tecnocentrico.

Per Maurizio Ferraris c'è un nucleo centrale nel ragionamento sui ruoli abilitanti della tecnologia che va rintracciato nella capacità della specie umana di connettere aspetti apparentemente lontani o tra loro estranei. Ferraris analizza la domanda "che senso ha", ricorrente nella storia e nello sviluppo di tutte le civiltà perché, di fatto, restituiscle la natura "diversa" della nostra specie rispetto alle altre forme viventi. Pur facendo riferimento ai cinque sensi (presenti in parte o integralmente in quasi tutte le specie biologiche) questo interrogativo si reitera a causa del nostro bisogno di essere sistematicamente connessi con meccanismi, attraverso i quali riceviamo e filtriemo input, *feedback* e sollecitazioni dall'ambiente esterno. Meccanismi, però, con i quali abbiamo sempre archiviate, manipolate, integrate e trasmesse informazioni utili per la nostra sopravvivenza materiale di esseri incompleti e anche per le nostre necessità di esseri spirituali.

È così che i cinque sensi sono stati interpretati non limitandosi al solo possesso di capacità funzionali, bensì estendendoli a modi di essere, ragionare e usare le nostre risorse intellettive. In particolare, Ferraris si sofferma sul senso del tatto. Tra le nostre capacità sensoriali, il tatto pervade l'intero nostro corpo-organismo e, attraverso lo sviluppo di membrane tecniche, ha

that Emery metaphorically highlights by evoking the image of the sorcerer's apprentice. Gradually, the modern myth of the liberating technique at the service of society has disappeared and, today, the technological bodies retreat with human subjects by monitoring, orientating, and guiding them, but also by possessing and dominating them through the imposition of rules, times, rhythms, and processes of the virtual world.

Due to the lack of a reconnection between humanistic and scientific thought, which does not allow to rebalance the relationships among actors, processes, means and ends, it is difficult, if not useless, to face issues concerning the sphere of living and building such as: de-automatisation of processes, overcoming technocratic drifts, disciplinary revision, and re-foundation of design paradigms.

Essentially, the possibility of conceiving the design of Architecture in a truly sustainable and humanised sense would decline without overcoming the pervasive "teleology of immanent utility", unless we take refuge in an illusory and comforting re-proposition of its absolute centrality in the domain of building our habitat. Its definitive inadequacy to face contemporary and future housing and planetary emergencies would also be established with this potential stalemate in the design evolution and the implications linked to it. Even technological innovations and their capability to play an enabling role for humanity would inexorably be destined to continue assuming an exclusively performing and tecnocentric character.

According to Maurizio Ferraris, there is a core in reasoning on the enabling roles of technology, which can be

ristabilito ogni volta nuove condizioni favorevoli per vivere. Il riferimento alle stratificazioni che si sono sovrapposte alla nostra epidermide naturale (evidentemente insufficiente), attraverso pellicce e membrane edilizie, ma anche alle pergamene, come membrane di supporto per la scrittura, ricostruisce un quadro in divenire tecno-antropologico. È quindi nel nostro destino o DNA dover ragionare sulle tecniche, connettendole in senso “filantropico”, per dar loro senso affinché possano continuare ad abilitarci a diversi livelli di preadattamento a ciò che noi siamo e saremo: esseri molteplici e ibridi, fisici e spirituali. Questo finanche in vista degli imminenti sviluppi delle membrane interattive che ci coinvolgeranno nelle dimensioni degli ambienti virtuali, delle realtà immersive e del metaverso. Paolo Tombesi riparte dalla definizione classica di economia, quale scienza profondamente legata allo studio dell’*òikos* e delle sue risorse. Evidenzia il ruolo centrale della pratica tecnologica come approccio metodologico necessario per comprendere e migliorare le relazioni fra comportamenti umani, finalità del nostro agire tecnico e disponibilità o scarsità di risorse. Tale pratica non può che manifestarsi ed essere fondamentale, nel suo ruolo abilitante, all’interno del progetto dell’architettura. Tombesi delinea quattro possibili ambiti preferenziali, non necessariamente esclusivi, che possono abilitare livelli di progressivo affinamento del progetto e dei suoi gradi di efficacia. Entrano così in gioco insiemi di variabili abilitanti plurime. Il primo riguarda gli assi di collaborazione che coinvolgono diversi attori e influiscono sulle decisioni da prendere in relazione a forme, processi, materiali e obiettivi esigenziali del progetto. Il secondo concerne le modalità d’azione tecnica, le procedure e le responsabilità delle filiere produttive che contribuiscono a

traced back to the capability of the human species to connect aspects that are apparently distant or unrelated to one another. Ferraris analyses the question “What does it mean?”, recurring in the history and development of all civilisations because, in fact, it gives back the “different” nature of our species compared to other life forms. While referring to the five senses (present partly or wholly in almost all biological species), this question is repeated due to our need to be systematically connected with mechanisms, through which we receive and filter inputs, *feedbacks* and solicitations from the external environment. They are mechanisms, however, with which we have always archived, manipulated, integrated, and transmitted useful information for our material survival as incomplete beings, and for our needs as spiritual beings, too.

This is how the five senses have been interpreted, not limited to the only possession of functional capabilities, but extended to ways of being, reasoning and using our intellectual resources. Particularly, Ferraris focuses on the sense of touch. Among our sensory skills, touch pervades our entire body-organism, and it has re-established new, favourable, living conditions every time, through the development of technical membranes. The reference to the stratifications, which have been overlapped on both our natural (obviously insufficient) epidermis, through furs and building membranes, and parchments, as supporting membranes for writing, develops a framework in techno-anthropological evolution. It is, therefore, part of our destiny, or DNA, that we must think about techniques, connecting them in a “philanthropic” sense, to give them

definire lo spazio abitativo e le sue prestazioni. Un terzo insieme include le condizioni geografiche e culturali che incidono sulle ragioni tecniche, costruttive e morfogenetiche. Non per ultime, sono centrali le logiche di analisi, interpretazione e ideazione, nel loro significato essenziale di ragionamenti sulle alternative che possono considerarsi verso un futuro preferibilmente non univoco e unidirezionale.

Attribuendo maggiore attenzione al *logos*, Tombesi rintraccia nel metodo “tecno-logico” un processo aperto che, attraverso filtri di indagine volta per volta diversi, può determinare condizioni diverse per ricondurre decisioni, forme di produzione dello spazio e relative scelte di risorse all’interno di una pratica euristica del fare progetto. La tecnologia, intesa come compendio di metodi, strumenti e tecniche, costituisce una risorsa insostituibile per comprendere, leggere, comparare e intervenire, in senso “politecnicistico”, all’interno dei quadri operativi del progetto contemporaneo che sono ormai caratterizzati da livelli di complessità sempre più elevati.

## Conclusioni

I contributi dei tre autori evi-  
denziano interpretazioni con  
sfumature diverse dei ruoli abilitanti delle tecnologie. È ogget-  
tivamente riscontrabile che avere un atteggiamento tecnologico, di fatto, ha sempre caratterizzato il processo evolutivo della  
specie umana per integrare le innovazioni tecniche nelle prati-  
che abitative della quotidianità. È fondamentale evitare, tutta-  
via, l’uso delle risorse tecnologiche (anche quelle cosiddette abi-  
litanti) in senso possessivo/sovrastante. Emerge invece la neces-  
sità di un loro impiego senza eludere i bisogni e le esigenze in-  
dividuali o collettive, le implicazioni che esse possono compor-

a meaning, so that they can continue enabling us at different levels of pre-adaptation to what we are and what we will be: multiple and hybrid, physical and spiritual beings. This even in view of the imminent developments of interactive membranes that will involve us in the dimensions of virtual and immersive realities, and the metaverse. Paolo Tombesi restarts from the classic definition of economics, as a science deeply linked to the study of the *òikos* and its resources. He highlights the central role of technological practice as a methodological approach, which is necessary to understand and improve the relationships among human behaviours, the purpose of our technical action, and the availability, or scarcity of resources. Such practice can only appear and be essential in the design of Architecture for its enabling role. Tombesi outlines four possible prefer-

ential areas, not necessarily exclusive, which can enable levels of progressive refinement of the design and its degrees of effectiveness. So, groups of multiple enabling variables come into play. The first group concerns the collaboration axes that involve different actors and influence decisions-making in relationship with forms, processes, materials, and design requirements. The second group concerns the methods of technical action, procedures, and responsibilities of the production chains, which contribute to defining the living space and its performance. The third group includes the geo- graphical and cultural conditions affecting the technical, construction and morphogenetic reasons. Last but not least, the rationale of analysis, interpretation and conception are central, in their essential meaning to think about the alternatives that can be considered

tare nei domini ecosistemici, sociali ed economici. In sintesi, bisogna comunque attribuire al concetto di abilitante un ruolo finalizzato al miglioramento della qualità dell'habitat.

Le condizioni per assumere modi di essere, abitare, sopravvivere e convivere con i propri simili non possono però disgiungersi da una continua ricerca di senso e finalità che assume caratteri plurali e multidimensionali sia progettuali, sia, al tempo stesso, di natura tecnologica e ambientale, per re-inventare continuamente le tecniche, ricondurle alla loro ineludibile finalità di risorse al servizio delle esigenze umane e rideterminare, ogni volta, nuove forme di adattamento (Guazzo, 2003). Il problema non è quindi classificare, riorientare, negare o esaltare le tecniche come risorse più o meno abilitanti. È di certo necessario superare quello stato di sospensione che, ciclicamente, si manifesta di fronte alle grandi innovazioni epochali. La vera sfida è però riappropriarsi delle capacità tecnologiche insostituibili di connettere o ricomporre i vari livelli tecnici in una visione organica che possa risultare abilitante per garantire, consolidare e migliorare le nostre attitudini comportamentali e abitative. Per raggiungere questo obiettivo, occorre esplorare le possibili forme d'impiego delle innovazioni nell'ambito della progettazione del nostro habitat, evitando le riduttive interpretazioni in senso sostitutivo e automatizzante (Stiegler, 2015) che spesso caratterizzano i primi approcci alle nuove scoperte. È soprattutto fondamentale recuperare quella capacità di pensare e tradurre in entità abitabili tutte le componenti materiali e immateriali del progetto, riconducendole alla costruzione di relazioni armoniche fra individui, società, tecniche e natura. Senza dimenticare che, qualsiasi atto progettuale è e dovrà essere sempre fondato su ragioni e opzioni tecnologiche con le quali

towards a preferably non-unique and unidirectional future.

Paying greater attention to the *logos*, Tombesi traces an open process in the “techno-logical” method which, through different investigative filters, time after time, can determine different conditions to bring back decisions, forms of space production and relative choices of resources within of a heuristic practice of designing. Technology, meant as a compendium of methods, tools and techniques, is an irreplaceable resource to understand, read, compare, and intervene, in a “polytechnical” sense, within the operating frameworks of contemporary design, characterised by higher and higher complex levels now.

#### Conclusions

The contributions from the three authors highlight differently nuanced

interpretations of the enabling roles of technologies. It is objectively verifiable that having a technological attitude has practically always characterised the evolutionary process of the human species to integrate technical innovations into daily inhabiting practices. However, it is essential to avoid the use of technological resources (even the so-called enabling ones) in a possessive/overhanging sense. Instead, the need to use them emerges without eluding either individual or collective needs and requirements, and implications that they may have in the ecosomatic, social and economic domains. Briefly, it is still necessary to attribute a role aimed at improving the quality of the habitat to the concept of enabler. The conditions to assume ways of being, inhabiting, surviving and coexisting with our fellow humans cannot be separated from a continuous search

avviare quei processi di modellazione dell'ambiente naturale senza i quali potrebbero essere messe in discussione le nostre stesse capacità di sopravvivenza.

#### REFERENCES

- Agamben, G. (2019), “Abitare e costruire”, *Quodlibet – Una voce*, 9 luglio 2019, available at: <https://www.quodlibet.it/giorgio-agamben-abitare-e-costruire> (accessed on 4 January 2023).
- Ceruti, M. and Bellucci, F. (2020), *Abitare la complessità. La sfida di un destino comune*, Mimesis, Milano.
- Commission of The European Communities (2009), *Preparing for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies*, COM (2009) 512 final e SEC (2009) 1257 final. 30.09.2009, Brussels.
- EU COM (2020), *Enabling Technologies for Industry 5.0. Results of a workshop with Europe's technology leaders*. European Commission, Brussels, available at: [https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/enabling-technologies-industry-50\\_en](https://research-and-innovation.ec.europa.eu/knowledge-publications-tools-and-data/publications/all-publications/enabling-technologies-industry-50_en) (accessed on 4 December 2022).
- Floridi, L. (2017), *La quarta rivoluzione industriale. Come l'infosfera sta trasformando il mondo*. Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Friedman, Y. (2003), *L'Architecture de survie. Una philosophie de la pauvreté*, Édition de l'éclat, Paris.
- Fromm, E. (1976), *To have or to be?*, Harper and Row, Publishers, Inc., New York.
- Galimberti, U. (1999), *Psiche e techne. L'uomo nell'età della tecnica*, Feltrinelli, Milano.
- Guazzo, G. (2003), “I molti modi del pensiero progettuale”, in Bertoldini, M. and Zanelli, A. (Eds.), *Tecnica, progetto e scienze umane*, CLUP, Milano, pp. 25-54.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2022), *Working Group III con-*
- for meaning and purpose, which has several and multidimensional characteristics both in terms of design and of a technological and environmental nature, to continuously re-invent techniques, lead them to their inescapable purpose of resources at the service of human needs and re-determine new forms of adaptation each time (Guazzo, 2003). The problem is, therefore, not to classify, redirect, deny or exalt techniques as more or less enabling resources. It is certainly necessary to overcome that state of suspension, which, cyclically, appears before great epochal innovations. However, the real challenge is to regain possession of the irreplaceable technological skills to connect or recompose the various technical levels in an organic vision that can be enabling to guarantee, consolidate and improve our behavioural and housing attitudes.
- In order to achieve this goal, it is necessary to explore the possible usage of innovations to design our habitat, avoiding the reductive interpretations in a substitutive and automating sense (Stiegler, 2015), which often characterise the initial approaches to new discoveries. It is essential to recover the ability to think and translate all the material and immaterial components of design into habitable entities, reducing them to the construction of harmonious relationships among human beings, society, techniques, and nature. Do not forget that any design is and must always be based on technological reasons and options with which those processes of modelling the natural environment must be started, and without which our own survival skills could be questioned.

*tribution to the Sixth Assessment Report of the IPCC, AR6 WGIII & Annex I. WMO, UNEP.*

Ministero dell'Università e della Ricerca (2020), *Programma nazionale per la ricerca 2021-2027*, MUR, Roma.

Nardi, G. (2000), "Tecnologia dell'Architettura", in *Enciclopedia Italiana - VI Appendice*, Istituto dell'Enciclopedia Italiana, Roma, available at: [https://www.treccani.it/enciclopedia/architettura\\_res-f37c5161-9b91-11e2-9d1b-00271042e8d9\\_%28Enciclopedia-Italiana%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/architettura_res-f37c5161-9b91-11e2-9d1b-00271042e8d9_%28Enciclopedia-Italiana%29/) (accessed on 4 December 2022).

Severino, E. (2021), *Tecnica e architettura*, Mimesis, Milano.

Stiegler, B. (2015), *La société automatique. L'avenir du travail*, Librairie Arthème Fayard, Paris.

STOA – Panel for the Future of Science and Technology (2021), *Key enabling technologies for Europe's technological sovereignty*, EPRS – European Parliamentary Research Service, Scientific Foresight Unit. European Union, Brussels, available at: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPKS\\_STU\(2021\)697184\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/697184/EPKS_STU(2021)697184_EN.pdf) (accessed on 5 December 2022).

United Nations (2015), *Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, United Nations – A/RES/70/1.

Virno, P. (2019), "Riflessioni sul verbo avere", in Bertolini, A. and Finelli, R. (Eds.), *Soglie del linguaggio corpo, mondi, società*, RomaTrePress, Roma, pp.103-114.

World Health Organization (2001), *ICF. International Classification of Functioning, Disability and Health*, WHO Press, Geneva.

Nicola Emery<sup>1</sup>, Filippo Angelucci<sup>2</sup>, Pietromaria Davoli<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Università della Svizzera Italiana, Accademia di architettura, Istituto di storia e teoria dell'arte e dell'architettura, Svizzera

<sup>2</sup> Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara, Dipartimento di Architettura, Italia

<sup>3</sup> Università degli Studi di Ferrara, Dipartimento di Architettura, Italia

nicola.emery@usi.ch

**Filippo Angelucci, Pietromaria Davoli.** *Negli studi che lei ha condotto sulle molteplici declinazioni del fare architettura, il tema delle potenzialità abilitanti della tecnologia emerge più volte ed è riconducibile a una più ampia questione che riguarda il rapporto fra l'uso delle tecniche e i significati dell'atto costruttivo. In questa direzione, è secondo lei possibile riorientare e, forse, rifondare la cultura tecnologica del progetto architettonico, ripartendo da alcune connessioni perdute tra individui, comunità e processi costruttivi?*

*Esistono già evidenze rispetto alle quali è necessario prospettare anche relazioni abilitanti completamente nuove fra l'abitare e il costruire?*

**Nicola Emery.** L'articolarsi della relazione soggetto/oggetto manifesta oggi in modo del tutto esplicito dinamiche fino a ieri solo sospettate, latenti e non ancora compiutamente decise nel tempo della modernità. "Riorientare", "rifondare la cultura tecnologica del progetto", per riprendere i termini della vostra domanda, che sono poi anche quelli che ho cercato di ripercorrere criticamente nel mio *Distruzione e progetto* per tentare una genealogia del tecno-capitalismo<sup>1</sup>, presuppone figure del soggetto e della società che nell'orizzonte del complesso tecno-dinamismo contemporaneo risultano negate e profondamente trasformate. Ricordare che le tecnologie erano iscritte, nell'utopia mitica della modernità, la Nuova Atlantide di Bacon, in un disegno di emancipazione nutrito dal senso secolarizzato, ancora cristiano, della salvezza, potrebbe essere importante, se

solo ancora ci si potesse porre la domanda del "riorientare" e del "rifondare" in termini 'semplicemente' umanistici, con annessa concezione semplicemente strumentale delle tecnologie e del loro uso teleologico.

La crisi della relazione soggetto-oggetto, della moderna gerarchia di potere fra questi poli, è parte del capovolgimento della mitica utopia tecnologica moderna nella realissima distopia nella quale ci troviamo, nel cui ambito il disegno di salvezza si è esplicitato, secondo una completa eterogenesi dei fini, come progressivo sterminio ecologico globale, gravido della tristissima estinzione, già in stato di forte avanzamento, della esuberante e stupefacente vita del pianeta.

Questo è insomma il nostro problema, un problema pieno di aporie e difficoltà, certo drammatico e finalmente non ignorabile, se non si vuole procedere con categorie desuete e consolare il lettore con una sorta di sempre ritornante metafisica del progetto, della sua ancora sempre iniziale centralità. Nei confronti delle dinamiche contemporanee e della rottura di paradigmi che esse implicano la "cultura del progetto" dovrebbe insomma capire, per dirla con il disincanto 'scientifico' di un certo Machiavelli, che è «più conveniente andare dritto alla verità effettuale della cosa, che alla immaginazione di essa». Immaginazione è intanto dare per scontato, come il termine "tecnologie abilitanti" surrettiziamente tende a fare, che vi sia uno schema teleologico di base, un finalismo umanistico buono e 'sostenibile' che si tratterebbe in qualche modo semplicemente di riuscire a progettare, di diventare abili a realizzare, utilizzando a

## INTERVIEW WITH NICOLA EMERY

**Filippo Angelucci, Pietromaria Davoli.** *In your studies on the multiple ways of making architecture, the topic of the enabling potentialities of technology emerges several times, and it can be linked with a wider question concerning the relationship between the use of techniques and the meanings of the action of building.*

*In such a direction, according to you, is it possible to redirect and maybe re-establish the technological culture of design, starting from any lost connections among people, communities and building processes?*

*Is there any evidence yet in relation to which it is also necessary to envisage completely new, enabling relationships between living and building?*

**Nicola Emery.** Today the subject/object relationship explicitly shows dynamics, hitherto only suspected, latent,

and not fully decided yet, in modern times. "Reorientation", "re-founding the technological culture of design", to resume the terms of your question, that are also those I have tried to critically retrace in my *Destruction and Design* to attempt a genealogy of techno-capitalism<sup>1</sup>, presupposes figures of both the subject and the society, which are denied and deeply transformed in the horizon of the complex contemporary techno-dynamism. It could be important to remember that the Technologies were written in the mythic utopia of modernity, New Atlantis by Bacon, in a plan of emancipation fuelled by a secularised, still Christian sense of salvation. It could make sense if we could still wonder about "reorientation" and "re-founding" in "simply" humanistic terms, with a simply instrumental concept of technologies and their theological use.

The crisis of the subject-object relationship, the crisis of the modern hierarchy of power between these two poles, is part of the process overturning modern technological mythic utopia into the very real dystopia we are living in. In such an ambit, the salvation plan is explicit, according to entirely heterogenetic ends, like a progressive global ecological extermination of the exuberant and wonderful life on Earth, full of the very sad extinction that is already in a strongly progressive state. Shortly, that is our problem. A problem full of aporias and difficulties, certainly dramatic, that cannot be ignored anymore, if we do not want to proceed with obsolete categories and console the reader with a sort of ever-recurring metaphysics of the project, and its ever initial centrality. Towards the contemporary dynamics and paradigmatic rupture that they involve, the "culture of

questo fine il mondo dei sensori e dei dispositivi. Tuttavia, oggi sappiamo che in primo luogo il soggetto stesso è sempre più monitorato e organizzato dalle cosiddette tecnologie abilitanti. L'oggetto è diventato una rete di dispositivi che retroagiscono permanentemente sul soggetto, lo seguono, lo guidano, lo animano, lo orientano, lo sorvegliano e lo puniscono, lo riducono a virtuale completa ineffettualità se egli non si attiene ai tempi tecnici che lo trascendono e lo impiegano. Con ciò sembra crollare non solo il principio della libertà morale, ma anche la categoria stessa del fine con il suo intrinseco significato critico; si cancella l'orientamento del progetto a un senso non immanente al processo in atto. Le tecnologie *abilitano* il soggetto a esser tale, ossia è dalla loro legislazione, dalla loro, per così dire, ontologia del possibile prestazionale, che avviene l'esclusiva legittimazione al fare. Questo vale sia per la dimensione individuale che per quella collettiva del soggetto.

Le tecnologie 4.0 lavorano in rete sempre più allargate e per farlo in modo sempre più completo esse sono sempre più dispiegate anche con "tecnologie impiantabili", che si presentano, residua e finale soglia nel sensibile, come "tatuaggi intelligenti". L'internet delle cose, che si modella anche come 'smart-city' – un'espressione sintomatica, un mix, un solo 'oltre' soggetto-oggetto – è già da tempo anche e necessariamente un internet dei corpi, entro un *general intellect* digitalizzato che si impone come vita postuma di un *logos spermatikos* o di un'*anima mundi* che dissolve compiutamente il dualismo natura/artificio entro una totalità della commutazione. Dissolta in termini post-emanatistici se non animistici pare certo anche la critica novecentesca della reificazione come caduta vuoi gnostica, vuoi storico-dialectica nell'alienazione, nell'inautenticità e nella passività.

design" should understand that it is «più conveniente andare dritto alla verità effettuale della cosa, che alla immaginazione di essa», to quote Machiavelli's "scientific" disenchantment. As the term "enabling technologies" tends to do surreptitiously, imagination is taking for granted that there is a basic theological design; so, there is a good and "sustainable" humanistic purpose that consists simply in managing to design and in being able to carry out something, using the sensory and device world for such a purpose. Moreover, firstly, nowadays we know that the subject is increasingly monitored and organised by the so-called enabling technologies. The object has become a network of devices permanently retroacting on the subject, that follow him/her, drive him/her, animate him/her, orientate him/her, supervise him/her, and punish him/her. They reduce him/her to a virtual absolute

infeasibility if he/she does not respect the technical times transcending and employing him/her.

Not only the principle of moral freedom, but also the category of the purpose itself, with its intrinsic critical meaning seem to collapse with it. The orientation of the design towards a non-immanent sense to the ongoing process is cancelled. Technologies *enable* the subject to be such. It is from their legislation, from their ontology of the possible performance, so to say, that the exclusive legitimisation "to do" takes place. That is true both for the individual and the collective dimension of the subject.

The 4.0 technologies work in an ever broader network, and to do so in an increasingly complete way, they are progressively deployed also with "implantable technologies", which present themselves, residual and final thresh-

I dispositivi funzionano, ragionano e noi post-umani con essi, entro una virtuale ritmica generale. È realisticamente chiaro che «i dispositivi non sono più unicamente indossati ma anche impiantati nei nostri corpi, in modo da fungere da strumenti per la comunicazione, la localizzazione e il controllo del proprio comportamento, nonché per svolgere funzione di monitoraggio del proprio stato di salute. [...] Tatuaggi intelligenti e speciali microchip potrebbero in futuro fornire un supporto fondamentale per l'individuazione e la localizzazione della malattia. I dispositivi impiantabili potrebbero altresì aiutare a comunicare pensieri solitamente espressi verbalmente attraverso smartphone interni e stati d'animo e riflessioni non manifestate, interpretando le onde cerebrali e altri tipi di segnali»<sup>2</sup>. Entro questo paesaggio, rischia di risultare irrealistico e incantato "rifondare" umanisticamente "il progetto". Il sogno della totalità biopolitica retta da una logica immanente che immunizza rispetto al negativo – la malattia, la follia, il godimento, l'eccesso della pulsione di morte – trova nel "tatuaggio intelligente" la sua, per altro già superata, marchiatura sensibile. Il paesaggio tecno-somatico post-umano può allora ancora ricordare – sempre che questa memoria involontaria non venga sedata in automatico dal presente programma di scrittura inoculante ad ogni conteggio di carattere destinale ordine sintattico e semantico – la celebre *colonia penale*, con gli aghi della grande macchina celibe kafkiana a stampare ovunque codici digitali-spirituali. «L'irrazionalità non è necessariamente una forza che opera fuori dall'ambito della razionalità; può derivare dai processi di un autoconservazione razionale che abbia 'perso la ragione'»<sup>3</sup>. Ma appunto, laddove l'autoconservazione funge come logica immanente e necessitante la digitalizzazione totale, dove la perdi-

old in the sensitive, as "intelligent tattoos". The Internet of things, which is also modelled as a 'smart-city' – a symptomatic expression, a mix, a *solo* 'beyond' subject-object – has already been also and necessarily the Internet of bodies for some time. It operates within a digitised *general intellect*, which imposes itself as the afterlife of the *seminal logos* or the *world soul*, which completely dissolves the nature/artifice dualism within a totality of commutation. The twentieth-century critique of reification as both Gnostic and historical-dialectical falling into alienation, inauthenticity and passivity certainly seems dissolved in post-emanatist, if not animistic, terms.

Devices work, reason and we post-humans work and reason with them, within a general virtual rhythm. It is realistically clear that «Devices are not just being worn, but also being

implanted into bodies, serving communications, location and behaviour monitoring, and health functions. [...] Smart tattoos and other unique chips could help with identification and location. Implanted devices will likely also help to communicate thoughts normally expressed verbally through a 'built-in' smart phone, and potentially unexpressed thoughts or moods by reading brainwaves and other signals»<sup>2</sup>.

"Re-founding" the "design" humanistically risks being unrealistic and enchanted within this landscape. The dream of biopolitical totality governed by an immanent rationale that immunises against the negative – disease, madness, enjoyment, the excess of the death impulse – finds its sensitive branding in the "intelligent tattoo", that has already passed, anyway. The post-human techno-somatic landscape can

ta di senso e di fine pare ancora soltanto un effetto collaterale, essa assume i tratti del *destino*. Le Eumenidi dell’immateriale/materiale *smart-city* che amministrano e pongono la legislazione del tatuaggio microchip sopra e dentro/contro ogni corpo in trincea, non sono di nuovo altro che sopravviventi Erinni, pattuglie di sensori impiantati e dispositivi smart allarmati-armati dalla forse sempre ancora possibile pazzia della felicità; desueta felicità, liberazione dalla rete del destino, come pazzia<sup>4</sup>.

L’applicazione della realtà aumentata negli allevamenti intensivi, con l’applicazione di visori in 3d alle mucche al fine di aumentare la loro produttività e certo in questo senso impiantati al fine di monitorare e curare anche la loro ‘salute’ ... , costi quel che costi in termini di sofferenza e allucinazione, non vale forse come un’immagine universale della condizione contemporanea? La ‘cura’ della condizione umana e dei nostri ‘pascoli’ di ‘crescita’ e allevamento – già l’antica figura della città pascolo delle *Leggi* di Platone<sup>5</sup> ... – si rispecchia in questa immagine, in questo salto di specie...come in uno specchio istorio; nella casa comune che brucia non si esprime forse la distruzione universale dell’esperienza sotto il gioco di una rete totale di sensori sentita come ritornante tessitura delle Moire?

**FA, PD.** *Per la specie umana, la centralità del costruire il proprio habitat è oggettivamente data dalla necessità di modellare uno spazio vitale e renderlo abitabile per colmare le nostre carenze biologiche e incapacità di adattamento. In tal senso, nella storia evolutiva dell’umanità, lo stesso fare tecnico ha assunto sempre un ruolo abilitante e qualificante, non limitandosi alla semplice risoluzione dei problemi.*

*Considerata la natura pervasiva delle innovazioni tecnologiche*

then still remember – provided that this involuntary memory is not automatically suppressed by the present inoculant writing programme at each character count of an established syntactic and semantic order – the famous *penal colony*, with the needles of the great celibate Kafkaesque machine to print digital-spiritual codes everywhere. «Irrationality is not necessarily a force operating outside the range of rationality: it may result from the processes of rational self-preservation “run amuck”»<sup>3</sup>. Precisely, whereas self-preservation acts as an immanent rationale requiring total digitisation, where the loss of meaning and purpose still seems only a side effect, it takes on the traits of *destiny*. The Eumenides of the immaterial/material *smart-city* who administer and enforce microchip tattoo legislation on and in/against each body in the trenches, are

again nothing but surviving Erinyes. They are patrols of implanted sensors and smart devices alarmed-armed by the maybe still possible madness of happiness; obsolete happiness, liberation from the network of destiny, like madness<sup>4</sup>.

Isn’t the application of the augmented reality in intensive farms, with the use of 3D viewers for the cows to increase their productivity and, of course, in this sense, implanted to monitor and also take care of their ‘health’, whatever it takes in terms of suffering and hallucination, a valid universal image of our contemporary condition?

The ‘care’ of the human condition and of our ‘pastures’ of breeding and “growth” – already the ancient representation of the grazing city of Plato’s *Laws*<sup>5</sup> ... – is reflected in this image, in this leap of species [...] as in a burning glass. In the burning common house,

*è possibile pensare, e in quali termini, a una tecnologia che continua a contribuire nel plasmare l’ambiente abitativo anche a fronte delle nuove sfide ecologiche, economiche e sociali che si prospettano per il prossimo futuro?*

*Per superare il dilagante tecnocratismo e le derive di un fare tecnico fondato sull’esclusivo pensiero calcolante, quali sono secondo lei i possibili ambiti di indagine da considerarsi nello sviluppo delle tecnologie per costruire l’habitat?*

**NE.** “Superare” il ‘tecnocratismo’ non mi pare possibile. La superabilità di ogni negativo rientra in una visione dialettica del movimento della storia sotto il segno, esplicito o implicito, di una provvidenza, ossia sotto il mito del risorgente respiro dello Spirito. Ovvero, un grande quadro di filosofia della storia porta nel profano, anche come prassi, lo schema teologico cristiano della morte che si supera nella resurrezione. Splendida figura, splendido appagamento di desiderio. Tuttavia, come disse Adorno commentando Beckett, “essere ottimisti oggi è da criminali”. Il capovolgimento della relazione soggetto/oggetto di cui ho detto, implica la sostituzione della teleologia di derivazione biblico-cristiana, volta al bene, alla salvezza, allo scopo esterno al processo, con una ‘teleologia dell’utile immanente’ che riproduce in forma allargata il processo. Sale certo ancora, per taluni, il cui numero è sempre più ristretto, l’estrazione di plusvalore, e si intensifica parallelamente per la moltitudine il dominio biopolitico, ma la riproduzione è circolare, in questo senso affatto teleologica, profondamente sedata nelle eventuali potenzialità dialettiche e disegna pertanto una sorta di circolo del destino. Non so se chi parla di “disautomatizzare” riesca a porsi fuori da uno schema dialettico, come, nel tempo dell’auto-

isn’t the universal destruction of the experience expressed under the game of a total network of sensors felt as a repetitive Moiré pattern?

**FA, PD.** *For the human species, the centrality of building one’s own habitat is objectively given by the need to model a living space and make it habitable to fill up our biological deficiencies and inability to adapt. In such a sense, in the evolutionary history of humanity, the same technical approach has always assumed an enabling and qualifying role, not limiting itself to mere problem-solving.*

*Given the pervasive nature of technological innovations, is it possible to conceive a technology that continues to shape the living environment even before the new ecological, economic, and social challenges prospected for the next future? If so, in what terms can this be done?*

*In order to overcome the pervasive technocratism and the drifts of a technical approach based on the exclusive calculating thought, what are, in your opinion, the possible areas of investigation to be considered in the development of technologies to build the habitat?*

NE. I do not think “overcoming” ‘technocratism’ is possible. Overcoming every negative is part of a dialectical vision of the history movement under either the explicit or the implicit sign of a providence, that is, under the myth of the resurgent breath of the Spirit. A great image of the Philosophy of History brings into profanity, even as a practice, the Christian theological scheme of death, which is overcome by the resurrection. Gorgeous figure, gorgeous fulfilment of all desire. Yet, “being optimistic today is for criminals”, as Adorno said when commenting on

mazione compiuta del soggetto, la ragione (se la si deve intendere scindendola dalla dimensione politica) mi sembra imponga di fare. Questa è senz'altro una linea di ricerca interessante<sup>6</sup>. L'era dell'automazione che si sviluppa come digitalizzazione integrale pare soffocare ogni classico-moderna pulsione dialettica al rovesciamento, occorre certo articolare altre linee di resistenza e di esodo, tuttavia forse solo reticolari di catacombe, sulla base di un paesaggio alla Beckett, una visione della smart-city da *Finale di partita*. L'economista Friedrich Pollock a questo riguardo, malgrado una certa reticenza, ha scritto cose lungimiranti già a metà Novecento per pensare la tarda modernità, il mondo nuovo di ascendenza huxleyana.

**FA, PD.** *C'è un non meno centrale aspetto che riguarda il concetto di automazione. In una fase di massima diffusione delle tecniche digitali e dei dispositivi tecnologici che possiedono ormai quasi infinite capacità emulativa delle funzioni umane, anche le relazioni fra l'abitare e il costruire iniziano a manifestare i sintomi di un disallineamento o almeno di un evidente sbilanciamento tra tecnologia, comportamenti, abitudini di produzione e consumo e abilità delle persone.*

*Tra gli orizzonti futuri della ricerca tecnologica dell'architettura, è ragionevole porre fra i temi d'indagine prioritari lo studio e la sperimentazione di nuove tecnologie in grado di ricostruire in modo più equilibrato le connessioni fra l'umanità e le risorse "non infinite" dell'ambiente?*

*Nel suo evolversi verso capacità sempre più facilitanti, quanto la tecnologia rischia di diventare uno strumento disabilitante che tenderà, anche attraverso l'automatizzazione, a sostituirsi integralmente alla natura progettante e costruttiva umana?*

Beckett. The overturning of the subject/object relationship, I have already mentioned, implies the replacement of the teleology of biblical-Christian derivation, aimed at the good, salvation, the goal external to the process, with a 'teleology of the immanent usefulness', which reproduces the process in an enlarged form. Certainly, the extraction of surplus value still increases for some people, whose numbers are diminishing, while the biopolitical domain is intensified for a multitude, at the same time. The reproduction is circular, and, in such a sense, it is not teleological at all, but deeply sedated in any dialectical potentialities and, therefore, it draws a sort of circle of destiny. I don't know if those who speak of "deautomatising" are able to place themselves outside a dialectical pattern, as reason (if it is to be considered by separating it from the political dimension) seems to

impose in the automation time of the subject. This is certainly an interesting line of research<sup>6</sup>. The automation era that is developing as integral digitisation seems to suffocate each classic-modern dialectical impulse towards overturning. Certainly, it is necessary to articulate other lines of resistance and exodus which, perhaps, risk being only networks of catacombs, based on a landscape as Beckett conceived it, an *End game* vision of the smart-city, anyway. In this regard, the economist Friedrich Pollock, despite a certain reticence, already wrote far-sighted things in the middle of the twentieth century to think about late modernity, the new world of Huxleyan matrix.

**FA, PD.** *There is another central aspect regarding the concept of automation. In a phase of maximum diffusion of digital techniques and technological devices*

**NE.** Occorre interrogarsi sul 'ragionevole', su che cosa appare ancora 'ragionevole' al di fuori del fungente, oggi. E farlo, mi sembra già parte di quella sospensione o *epoché*, di matrice prima scettica che fenomenologica, che si è già evocata come "disautomatizzazione". In questo senso, la 'pazzia', ovvero la morale come pazzia anti-utilitaristica che interrompe il destino, non è ragionevole? La moralità che non calcola è semplicemente irragionevole? La nostra scena è quella di un eternizzato *Finale di partita*, con i grandi e debordanti secchi cosmici delle scorie tenuti a fatica nel Terzo o Quarto mondo, il paesaggio globale quello della città-dispositivo-incubatrice di un compiuto *Brave New-world*.

Per pensare le antinomie delle tecnologie abilitanti, il paradosso di una 'facilitazione' che esonera l'umanità non solo e non tanto dalla fatica del lavoro materiale (che resta nascosto ma perdura, non da ultimo per procurare minerali e terre rare imprescindibili proprio per le tecnologie 4.0 tanto *green*) ma che esonera anche dalla possibilità della libertà morale della scelta e del rifiuto, sia sul piano individuale che collettivo e politico, soffermiamoci sul vecchio e dimenticato libro di Pollock dedicato alle ripercussioni economiche e sociali dell'automazione<sup>7</sup>. Pubblicato in prima edizione già nel 1954, l'economista della Scuola di Francoforte ne fece una rinnovata seconda edizione nel '64, al fine di aggiornare ulteriormente i suoi riferimenti alla letteratura specialistica di ambito tecnologico.

Se nell'ultima frase di *Automation* si saluta la possibilità di inserire l'automazione in un sistema sociale libero, sulla base di una pianificazione in grado di aprire, con l'aiuto dei nuovi metodi «la via a un ordinamento sociale razionale»<sup>8</sup> poche pagine prima, pur cercando di prendere le distanze dalle conclusioni

*that now possess almost infinite emulative abilities of human functions, even the relationships between living and building are starting to show the symptoms of a misalignment or, at least, an evident imbalance among technology, behaviours, both production and consumption habits, and people's skills. Is it reasonable to place the study and experimentation of new technologies able to reproduce the connections between humanity and "non-infinite" resources of the environment in a more balanced way, among the priority research topics in the future horizons of research in architectural technology?*

*As it evolves towards more and more facilitating abilities, how much does technology risk becoming a disabling instrument that will tend to completely replace the design and construction of human nature, even through automation?*

**NE.** We need to ask ourselves about the 'reasonable', about what still appears 'reasonable' outside that which is occurring today. Doing so already seems to me to be part of that suspension of judgment, or *epoché*, of a sceptical rather than phenomenological matrix, which has already been evoked as "deautomatisation". In such a sense, isn't 'madness', that is morality meant as anti-utilitarian madness that interrupts destiny, reasonable? Is morality, which is not calculating, simply unreasonable? Our scene is that one of eternised End gaming, with the great and overflowing cosmic buckets of waste, held with some difficulty, in the Third or Fourth world, the global landscape, that one of the city-device-incubator of an accomplished *Brave New-world*. We can linger over Pollock's old and forgotten book on the economic and social repercussions of automation<sup>7</sup>

più “scettiche” già espresse dal padre della cibernetica Norbert Wiener, Pollock osserva: «Converrà forse attirare ancora una volta l’attenzione sui pericoli che si nascondono nel fatto che misconoscendo i limiti dell’autoregolazione nell’ambito dell’economia di mercato, l’automazione viene introdotta senza la minima preoccupazione per le sue conseguenze sociali, ovunque permette vantaggi nel senso dell’economia privata. Coloro che agiscono così, potrebbero con l’ingenuità dell’apprendista stregone mettere in moto forze che nessun esorcista benevolo potrà arrestare in tempo, aprendo a una tirannide armata di strumenti finora mai visti»<sup>9</sup>. Se nella citata frase finale del libro si parla di “nuovi metodi”, qui si tratta invece di *forze*, si parla di inconsapevole messa in movimento di forze (*Kräfte*<sup>10</sup>), che se non contrastate ovunque possono permettere dapprima “vantaggi nel senso dell’economia privata” ma sottopongono poi la società a tali scosse e urti – a tali “gesellschaftlichen Erschütterungen” – da spianare la strada a una nuova tirannia – «einer neuen, mit noch nie dagewesenen Hilfsmitteln ausgerüsteten Tyrannei den Weg bahnen»<sup>11</sup> – una tirannia “nuova” in quanto “armata di strumenti sin qui nemmeno mai esistiti”.

I metodi tecnologici sono *forze*, potenze che permettono “vantaggi all’economia privata”, non gestibili in termini di semplice “autoregolazione”, e la cui mobilitazione prosegue scuotendo con forze inaudite, con barbariche *Erschütterungen*, la società. Ecco il *Zauberlehrling* di goethiana memoria, ancora una volta e più maldestro che mai l’apprendista stregone liberista.

La volontà di affermazione di queste *Kräfte*, che si esprime nell’espansività dell’automazione sull’intero ambito del vivente, non trova in nessun modo la sua espressione compiuta nella vittoria dell’economia privata, ma nell’instaurazione ulteriore

to think about both the antinomies of enabling technologies, and the paradox of a ‘facilitation’ which exonerates humankind not only, and not so much, from the fatigue of its own material work (which remains hidden, but which persists, not least to procure minerals and rare lands that are essential precisely for the *green 4.0 technologies*), but also from the possibility of moral freedom of choice and refusal, at individual, collective, and political level.

Already published in the first edition in 1954, the Frankfurt School economist made a renewed second edition in 1964, to further update his references to specialist literature in the technological field.

In the last sentence of *Automation*, the possibility of inserting automation into a free social system is welcomed, based on a plan able to open «a social system

based upon reason»<sup>8</sup>, thanks to new methods. A few pages earlier, while trying to distance himself from the more “sceptical” conclusions already expressed by Norbert Wiener, the Father of Cybernetics, Pollock observes: «It may be proper at this point once again to draw attention to some of the evils that might be expected if-without recognizing its limitations in the modern economy we allowed automation to be introduced whenever it appeared to be profitable to a firm to do so. The social consequences of automation cannot be ignored because a group of individuals might make money from it. Those who do so resemble the feckless sorcerer’s apprentice who set forces in motion of which no responsible sorcerer would ever approve. The too rapid introduction of automation might bring with it social catastrophe that only a totalitarian government

(anche a costo di una crisi mortale del capitale privato) di una “tirannia ricca di strumenti sinora mai visti”. Eterogenesi dei fini parziale, la prima, a cui segue quella totale, la tirannia tecnocratica in cui la teleologia collassa totalmente a favore della riproduzione autocratica del potere.

Friedrich Pollock, come già accennato, aveva prognosticato, già negli anni Trenta – e pressoché in presa diretta con l’avvento sia di nazionalsocialismo sia dello Stato autoritario sovietico –, l’avvento di un *capitalismo di stato* in grado di negare-conservare lo sfruttamento del lavoro, negando la destinazione privata del plusvalore ma al contempo conservandola e pietrificandola nella sua destinazione a favore dello Stato razziale autoritario. Occorre pensare il presente, per quanto imbellettato dal mito del 4.0, a partire anche da questa prognosi, disinnescare il rapporto ingenuo con le tecnologie abilitanti che troppo spesso ancora mascherano e legittimano una perdurante *banalità del male*, millantata ancora sempre fra il nuovo filo spinato di sensori e feroci boe ‘intelligenti’ come immodificabile destino.

would be strong enough to handle»<sup>9</sup>. If in the cited final sentence of the book we speak of “new methods”, here we are speaking, instead, of *forces*, we speak of the *unconscious setting in motion of forces* (*Kräfte*<sup>10</sup>). Forces which, if not counteracted everywhere, can first allow “advantages in the sense of the private economy”, but then subject society to such shocks and bumps – to such “gesellschaftlichen Erschütterungen” – to open the way for a *new tyranny* – «einer neuen, mit noch nie dagewesenen Hilfsmitteln ausgerüsteten Tyrannei den Weg bahnen»<sup>11</sup> – a “new” tyranny, in the meantime, as it is “armed with instruments that have never existed up to now”. Technological methods are *forces*, powers that allow “advantages to the private economy”, which cannot be managed in terms of simple “self-regulation” and whose mobilisation contin-

ues shaking society with unbelievable forces, with *barbaric Erschütterungen*. Here is the *Zauberlehrling* of Goethean memory, once again and clumsier than ever, the liberal sorcerer’s apprentice. The desire for the affirmation of these *Kräfte*, which is expressed in the expansiveness of automation over the whole ambit of the living, does not find its complete expression in the victory of the private economy any way, but in the further establishment (even at cost of a deadly crisis of private capital) of a “tyranny rich in instruments never seen before”. The first partial heterogenisis of ends, followed by the total one, the technocratic tyranny where teleology totally collapses in favour of the autocratic reproduction of power. Friedrich Pollock, as already mentioned, had prognosticated, already in the thirties – and almost directly with the advent of both National Socialism

## NOTE

<sup>1</sup> Cfr. Emery, N. (2011), *Distruzione e progetto. L'architettura promessa*, Marzolla, Milano.

<sup>2</sup> Schwab, K. (2016), *The Fourth industrial revolution*, World Economic Forum, Geneva, Switzerland, trad. it. *La quarta rivoluzione industriale*, FrancoAngeli, Milano, p. 146.

<sup>3</sup> Adorno, T.W. (1985), *Stelle su misura*, trad. it. Paoli, N., Einaudi, Torino, p.4.

<sup>4</sup> Ho svilupato questa critica del destino nel mio (2022), “Itinerari nella Sonnenstube der Schweiz. La critica del destino nel giovane Benjamin”, in Maggi, M. (Ed.), *Walter Benjamin e la cultura italiana*, Olschki, Firenze, pp.1-38.

<sup>5</sup> Dopo averla posta al centro del mio libro (2017), *Progettare, costruire curare. Per una deontologia dell'architettura*, Casagrande, Bellinzona, III ed., sono ritornato su questa immagine in un mio intervento successivo: cfr. (2020), “Il dettaglio e la piccola porta. La cura come immagine dialettica”, in Miano, P. (Ed.), *Healthscape. Nodi di salubrità, attrattori urbani, architetture per la cura*, Quodlibet, Macerata, pp. 43-53.

<sup>6</sup> Cfr. Stiegler, B. (2019), *La società automatica*, Meltemi, Milano. Sul motivo della disautomatizzazione si interroga opportunamente Igor Pelgreffi nella sua prefazione alla traduzione italiana del volume.

<sup>7</sup> Per inquadrare l'opera di Friedrich Pollock mi permetto di rinviare al mio (2022) *For Nonconformism. Max Horkheimer and Friedrich Pollock: The Other Frankfurt school*, Brill, Leiden; sul tema specifico dell'automazione cfr. Emery, N. (Ed.), (2018), *Automazione e Teoria Critica. A partire da Friedrich Pollock*, Mimesis, Milano. I concetti espressi qui di seguito sono sviluppati adeguatamente nel mio saggio “Automazione e violenza. Una prognosi riservata”, ivi, pp. 103-117.

<sup>8</sup> Pollock, F. *Automation. Materialen zur Beurteilung ihrer ökonomischen und sozialen Folgen*, Europäische Verlagsanstalt, Frankfurt am Main 1956; II edizione, Europäische Verlagsanstalt, Frankfurt am Main 1964; *Automazione. Dati per una valutazione delle conseguenze economiche e sociali*, tr. it. Piero Bernardini e Renato Solmi, Einaudi, Torino, 1956; II ed. *Automazione*.

and the Soviet authoritarian state – the advent of a *state capitalism* able to deny-preserve the exploitation of labour, denying the private destination of the surplus value, but preserving and petrifying it in its destination in favour of the authoritarian racial state, at the same time. It is necessary to think about the present, even if it is embellished by the myth of 4.0, also starting from this prognosis, to defuse the naïve relationship with the enabling technologies, which too often still mask and legitimise a persistent *banality of evil*, still boasted between the new barbed wire of sensors and fierce ‘intelligent’ buoys, as an unchangeable destiny.

## NOTES

See Emery, N. (2011), *Distruzione e progetto. L'architettura promessa*, Marzolla, Milano.

<sup>2</sup> Schwab, K. (2016), *The Fourth industrial revolution*, World Economic Forum, Geneva, Switzerland, trad. it. *La quarta rivoluzione industriale*, FrancoAngeli, Milano, p. 146.

<sup>3</sup> Adorno, T.W. (1957), “The stars down to earth: The Los Angeles Times astrology column, a study in secondary superstitution”, *Jahrbuch für Amerikastudien* 2, pp. 19-88, reprinted in Adorno, T. W. (1994), *The stars down to earth and other essays on the irrational in culture*, ed. Stephen Crook, Routledge, London, and New York.

<sup>4</sup> I have developed this critique to the destiny in my (2022), “Itinerari nella Sonnenstube der Schweiz. La critica del destino nel giovane Benjamin”, in Maggi, M. (Ed.), *Walter Benjamin e la cultura italiana*, Olschki, Firenze, pp.1-38.

*Conseguenze economiche e sociali*, tr.it. Giorgio Backhaus, Piero Bernardini Marzolla e Renato Solmi, Einaudi, Torino, 1970, p.371.

<sup>9</sup> Ibid., p. 356; cfr. inoltre ivi, p.344 e p.321.

<sup>10</sup> Pollock F., *Automation...*, 1964, p. 340.

<sup>11</sup> Ibidem.

*school*, Brill, Leiden; about the specific issue of automation see Emery, N. (Ed.), (2018), *Automazione e Teoria Critica. A partire da Friedrich Pollock*, Mimesis, Milano. The concepts expressed here are adequately developed in my essay “Automazione e violenza. Una prognosi riservata”, ivi, pp. 103-117.

<sup>8</sup> Pollock, F. (1957), *Automation. A Study of its Economic and Social Consequences*, Praeger Publishers, New York, p. 253.

<sup>9</sup> Ibidem, p. 248.

<sup>10</sup> Pollock, F. (1964), *Automation. Materialen zur Beurteilung ihrer ökonomischen und sozialen Folgen*, Europäische Verlagsanstalt, Frankfurt am Main 1956; II Edition, Europäische Verlagsanstalt, Frankfurt am Main, p. 340.

<sup>11</sup> Ibidem.

Maurizio Ferraris,  
Università di Torino, Dipartimento di Filosofia e Scienze dell'Educazione, Italia

maurizio.ferraris@unito.it

Non da sempre l'umanità è chiamata a salvare sé stessa. Non troppi secoli fa, il compito era affidato a Dio, e il conto lo si sarebbe pagato nell'aldilà, senza danneggiare l'ambiente. Ora non è più così. L'umanità è responsabile, nel bene come nel male, di quello che accade, e raramente si tratta di buone notizie: crisi ecologiche, economiche, guerre, pandemie. Al tempo stesso, concependosi più come un progetto aperto e in divenire che come l'esecuzione di un mandato trascendente, l'umanità si trova impegnata in continui processi di ridefinizione che riguardano i diritti, il genere, la società.

Così, mentre una società altamente organizzata come quella delle termiti non si troverà mai esposta alla prospettiva di far fronte a delle sfide globali, l'umanità è da sempre ossessionata, e non a torto, dalla fine del mondo, dall'apocalisse, dal *dies irae*. Tutte preoccupazioni che nel tempo, con la crescita – almeno in linea di principio – della speranza riposta nella tecnica, nella storia e nell'umanità, si trasformano in sfide, ossia in problemi da risolvere. Sino a innescare una retorica della sfida sottilmente ingannevole perché non sta scritto da nessuna parte che le sfide si vincano. Ciò non toglie che le sfide si possono vincere, e che impegnarsi nella sfida è preferibile ad affidarsi al fatalismo con cui Heidegger dichiarò che ormai solo un Dio ci può salvare, con un nichilismo che è stato il basso continuo della filosofia del Novecento ma che non è più, fortunatamente, la passione fondamentale della filosofia del nostro secolo. Che è immersa in un clima spirituale profondamente diverso, più propositivo, soprattutto perché le sfide globali richiedono risposte interdisciplinari, e qui torna buona la filosofia non più come regina delle scienze (altri tempi ...) ma, secondo la celebre definizione di Umberto Eco, come tuttologia, come capacità di legare punti apparentemente irrelati.

## THE INTERDISCIPLINARY ANIMAL

Humans are not always asked to save themselves. Not too many centuries ago, this task was given to God, and the bill would be paid in the afterlife, without damaging the environment. Now it is not this way. Humans are responsible for what happens, for better or for worse, and there is rarely good news: ecological or economic crisis, wars, and pandemics. At the same time, humans are engaged in continuous processes of redefinition involving rights, gender, and society, considering themselves more as an open project in progress than as the execution of a transcendent mandate. A highly organised society, such as that of the termites, will never be exposed to face global challenges, while humans are always obsessed, not wrongly, by the end of the world, the Apocalypse, and *dies irae*. Over time these worries turn into challenges, that is into problems to be solved, with the

Non c'è scelta, del resto, perché se c'è una cosa su cui non farei affidamento sarebbe una salvezza venuta da Dio, che, se c'è, ha di meglio da fare che di occuparsi di una delle infinite specie che vivono e muoiono in un punto sperduto dell'universo. Non mi sentirei troppo fiducioso neppure nel caso in cui la salvezza fosse demandata a una scienza particolare, che so, la medicina o l'economia; il risultato sarebbe che ci troveremmo, nella migliore delle ipotesi, tutti sani e tutti poveri o tutti malati e tutti ricchi. Non a caso, l'ecologia è, tipicamente, un sapere trasversale, ma non abbastanza, come dimostra lo slogan "salviamo il pianeta" (perché non l'universo, già che ci siamo?). Qui la filosofia potrebbe suggerire che il punto consiste invece nel garantire un ambiente socialmente ed ecologicamente compatibile con le forme di vita umana e quelle altre forme di vita coerenti con essa (ad esempio, non sarei troppo tenero con i virus, posto che siano davvero viventi). Ed è qui che, appunto, si aprono le sfide globali, che sono del tutto naturalmente delle sfide interdisciplinari.

### Perché proprio a noi?

Ci si può chiedere, legittimamente, perché proprio a noi tocchino queste sfide, ma il motivo è sin troppo ovvio. Gli organismi evolvono nella loro storia naturale grazie alla selezione, dunque molto lentamente. Ma quell'organismo sistematicamente connesso con meccanismi che è l'umano evolve anche per via tecnologica, ossia molto più rapidamente, con quella che si presenta come una esistenza storica (e che ovviamente produce *shock* culturali che in natura non si danno). La rapidità della trasformazione, come si diceva, genera forme di timore nei confronti di un processo e di un progresso che appaiono troppo veloci rispetto alle capacità di adattamento umano.

growth – at least as a principle – of the hope placed in technology, history, and humanity; to the point of starting a slightly misleading rhetoric of the challenge, as nobody can say challenges must be won.

This does not mean that challenges cannot be won; being engaged in a challenge is better than trusting in fatalism, according to which Heidegger declared only a God can save us now, with a nihilism that was the low continuum of the XX century philosophy. Fortunately, it is not the essential passion of the philosophy of our century anymore. It is immersed in a deeply different, more prepositive spiritual atmosphere, above all because global challenges need interdisciplinary answers, and here philosophy is needed, not as the queen of the sciences (other times ...), but according to the famous Umberto Eco's statement as poly-

maths, that is the skill to link apparently unrelated points.

There is no choice because if there is something I won't rely on, it would be our salvation from God, who, in case He exists, has got better things to do than caring for one of the endless species living and dying in a dispersed part of the universe. I won't trust even if salvation depended on a particular science like medicine or economics; the result would be that we would all be either healthy and poor or sick and rich, in the best hypothesis. It is not a case that ecology is a typically transversal knowledge, but not enough, as the slogan "let's save our planet" shows (why not the universe, while we are at it?). Here philosophy could suggest the point consists in guaranteeing a socially and ecologically friendly environment with human life forms and other life forms consistent with it (for instance, I

Questa è sicuramente un'esperienza che non tocca agli animali. Se vedessimo un leone di duemila anni fa, immagino che non sarebbe molto diverso da un leone contemporaneo; mentre se per qualche motivo incontrassimo un umano di duemila anni fa, apparirebbe molto diverso da noi, nel vestire, nel gestire, nella lingua che parla, nei valori e nei riferimenti culturali a cui si richiama. In altre parole, non troveremo mai un coccodrillo che si lamenta di non capire le giovani generazioni, benché in effetti i coccodrilli possano essere molto longevi e possano quindi osservare l'avvicendarsi di molte generazioni. Lo *shock* intergenerazionale, così come lo *shock* dovuto alla evoluzione tecnologica che spesso sta alla base dell'evoluzione sociale, richiede una rapidità che è accessibile soltanto a coloro che riescono a capitalizzare il passato in maniera esplicita attraverso la scrittura cioè appunto agli umani.

Sotto questo profilo, non bisogna dimenticare che molto spesso i timori nei confronti della tecnologia hanno come risultato il naturalizzare una tecnologia immediatamente precedente. Gran parte delle obiezioni che oggi vengono mosse nei confronti del web, venivano mosse trenta o quarant'anni fa nei confronti della televisione, che a questo punto appare invece uno strumento tutto sommato innocente e tranquillizzante. Non fatico a immaginare la scena di un genitore che dice al figlio "smettila di instupidi davanti al telefonino, guarda un po' di televisione". O si pensi alla singolare argomentazione di Heidegger secondo cui la scrittura a macchina tradirebbe, per la propria eccessiva dipendenza dalla mediazione tecnica, la purezza del pensiero. Quello che è interessante è che Heidegger considera invece naturale, e dunque conforme ai bisogni profondi del pensiero, la scrittura a mano: la quale è a tutti gli effetti una tecnica, che si

won't be too good with viruses, established that they are alive). Here global challenges are opened that are quite naturally interdisciplinary challenges.

#### Why us?

Legitimately we can ask why these challenges happen just to us, but the reason is too obvious. Organisms evolve in their natural history thanks to selection, so in a very slow way. But the organism systematically connected to mechanisms like the human being also evolves through a technological way, that is in a faster way, with what is shown as a historical existence (and which obviously produces cultural shocks that do not happen in nature). The speed of the transformation, as we said, generates forms of fear towards a process and a progress that seem to be too fast when compared to human adaptability.

This is certainly an experience that does not concern animals. If we saw a lion dating back to two thousand years ago, I imagine it would not be very different from a contemporary lion; while if, for some reason, we met a human being dating back to two thousand years ago, he would appear very different from us, in attire, in managing, in the language he speaks, in his values and cultural references. In other words, we will never find a crocodile complaining that it cannot understand younger generations, although crocodiles can be very long-lived and can observe the alternation of many generations. The intergenerational *shock*, as well as the *shock* due to the technological evolution that is often the basis of the social evolution, requires a speed that is accessible only to those who can capitalise on the past explicitly through writing, that is accessible exactly to humans.

apprende con fatica insieme a tante altre tecniche che ci determinano come umani.

E non dimentichiamo che era proprio sulla scrittura a mano, ossia sulla perfetta espressione del pensiero secondo Heidegger, che si appuntavano le critiche di Platone nei confronti di una scrittura che in quanto tale – e ovviamente si parlava di manoscrittura – sarebbe corrottrice del pensiero. Sono gli *shock* della cultura che, diversamente da quelli della natura, investono solo gli animali umani, e non gli organismi. Ma, cosa che oggi appare specialmente interessante, che non investono neppure i meccanismi, gli automi, le grandi o piccole macchine che ci circondano. Perché gli *shock* tecnologici investono la questione del senso dell'esistenza.

#### Che senso ha?

Riflettiamoci un istante. Non possiamo immaginare un computer che si chiede "che senso ha?", dal momento che il senso gli è assegnato dal programma (dunque non può chiedersi "che senso ha" più di quanto lo possa fare un coltello, anche svizzero). Ma non possiamo neppure immaginare un animale che si chiede "che senso ha?". E questo non solo perché l'animale non parla, e comunque non possiede il vocabolario simbolico in cui la parola "senso" possa aver senso, ma soprattutto perché l'animale, come ogni organismo, compreso quello umano, non ha senso, ossia possiede soltanto una finalità interna. La rosa è senza perché, e nel nostro piccolo anche noi siamo senza perché. Ma allora per quale motivo gli umani così frequentemente pronunciano una frase come "che senso ha?", e perché soltanto gli umani possono entrare in depressione se vien meno per loro il senso dell'esistenza? Come è possibile avvertire la mancanza di

From this point of view, do not forget that fear of technology very often result in the naturalisation of an immediately previous technology. Most of the objections raised today against the Web were raised against television thirty or forty years ago, which now appears, instead, a quite innocent and reassuring instrument. I think it is easy to imagine the scene of a parent telling his/her child "Stop getting foolish before your mobile phone, let's watch some television". Otherwise, think about Heidegger's singular issue, according to which typewriting would betray the purity of thought due to its excessive dependence on technical mediation. What is interesting is that Heidegger considers handwriting something natural and, therefore, in accordance with the deep needs of the thought: which is a technique learnt with effort together with so many other techniques that deter-

mine us as human beings.

Do not forget that it was precisely on handwriting, that is, on the perfect expression of thought according to Heidegger, that Plato's criticisms were noted against writing – and obviously they talked about handwriting – as it would be a thought corrupter. They are the culture *shocks* which, unlike those of nature, affect only human animals, not all organisms. What seems particularly interesting today is that mechanisms, automata, large or small machines surrounding us do not even affect us, as technological *shocks* affect the sense of existence.

#### What sense does it make?

Let's think about it for a while. We cannot imagine a computer wondering "What sense does it make?", since it is assigned the sense by the programme (therefore it cannot wonder "What

senso di qualcosa che, per definizione, non ha senso? Ciò deriva dal carattere costitutivo dell'essere umano, quello di essere un organismo che, diversamente da tutti gli altri, è sistematicamente connesso con un meccanismo.

In quanto organismo ha una finalità interna, ossia un'assenza di finalità: deve tenersi in vita il più a lungo possibile. In quanto organismo sistematicamente connesso a dei meccanismi, cioè a degli artefatti dotati di una finalità esplicita ed enfatica (la penna è fatta per scrivere, il coltello è fatto per tagliare...) e a una società che come tale è un sistema di finalità esterne (il medico è fatto per curare, il professore per insegnare...), riceve retroattivamente, attraverso l'educazione e le regole, una serie di finalità esterne che, se non esaudite o non trovate, rendono perfettamente verosimile, per un umano, una domanda come "che senso ha". Non è l'unica domanda che risulti di pertinenza esclusiva di un umano; passiamone in rassegna alcune che ci mostreranno i motivi per cui l'intelligenza artificiale ha così tanto bisogno dell'intelligenza naturale, e della filosofia in particolare.

Hegel ha scritto che "senso" è una parola meravigliosa perché indica al tempo stesso la presenza immediata è il significato, l'idea, lo scopo ultimo. Questo raddoppiamento del materiale nello spirituale, del sensibile nell'intelligibile, riguarda in effetti tutti i sensi. Avere occhio non significa semplicemente possedere un organo destinato alla visione, significa anche disporre di un qualche peculiare acume sociale e culturale. Ugualemente, avere orecchio non significa semplicemente possedere delle orecchie, ma comporta il possesso di doti musicali speciali, come per esempio l'orecchio assoluto, o comunque disporre di una sensibilità artistica particolarmente sviluppata.

Non stupirà a questo punto che avere fiuto non significhi sem-

sense does it make?" more than a knife, even a Swiss one). We can't even imagine an animal wondering "What sense does it make?". That is not only because the animal does not speak and it has not got the symbolic vocabulary where the word "sense" can make sense, but above all because the animal, like each organism, including the human one, has no sense, that is, it possesses only an internal purpose. The rose is without a reason, and in our small way we are without a reason, too.

Then, why do humans so often say a sentence like "What sense does it make"? Why can only humans go into depression if they lose the sense of their existence? How is it possible to perceive the lack of the sense of something that does not make sense by definition? This derives from the constitutive character of the human being, that of being an organism which, unlike all others, is sys-

tematically connected to a mechanism. As an organism, it has got an internal purpose, that is an absence of purposes: it must keep itself alive as long as possible. As an organism systematically connected to mechanisms, that is both to artefacts endowed with an explicit and emphatic purpose (the pen is made for writing, the knife is made for cutting...) and to a society, which is a system of external purposes (the doctor is made to treat, a professor to teach...), it retroactively receives, through education and rules, a series of external purposes which, if not fulfilled or not found, ask a question like "What sense does it make?", which is perfectly plausible for a human being. It is not the only question that is exclusively pertinent to a human being. Let's see other questions that will show us the reasons why artificial intelligence needs natural intelligence so much, and particularly philosophy.

plicemente disporre di un naso, ma significhi anche possedere delle doti di ricerca e di interpretazione che vanno al di là della media degli altri esseri umani. Non c'è dubbio che Maigret abbia fiuto per le indagini, e Simenon insiste precisamente su questo fiuto come dote naturale che non abbisogna di alcun incremento metodico o culturale. Lo stesso vale per il gusto, che non è soltanto la capacità di cogliere i sapori dei cibi, ma è la dote di giudicare con particolare competenza in questioni estetiche, o comportamentali, tanto da essere considerati delle persone di buon gusto. Inoltre, nel caso specifico del gusto, abbiamo l'espressione "avere gusto" come "avere piacere", avere inclinazione, essere orientati verso un qualche scopo, quanto dire che abbiamo delle finalità disposte attivamente, e non solo passivamente, come a rigore dovrebbe essere se si trattasse semplicemente della applicazione di una disposizione sensibile. Non c'è nulla di stupefacente, a questo punto, nel constatare che anche nel caso del tatto abbiamo un raddoppiamento, anche più polarizzato fra quelli che abbiamo esaminato sinora. Perché Aristotele, con una considerazione di buon senso ("buon senso"! Ci torneremo fra poco), considera che il tatto è il senso minimale il più fondamentale per ogni vivente perché in assenza di tatto un vivente non potrebbe che essere distrutto. Possiamo infatti immaginare viventi senza occhi, senza orecchie, senza odorato, ma è molto difficile pensare che un vivente sia privo del tatto e questo per un motivo fondamentale e cioè che in assenza di tatto ossia in assenza di quell'intermediario che ci mette in contatto con il mondo esterno potremmo avere una qualche forma di esistenza e soprattutto una forma di sopravvivenza. Non è infatti per nulla difficile immaginare un animale che muore bruciato proprio per assenza di tatto. Tuttavia, per contrappo-

Hegel wrote that "sense" is a wonderful word because it shows the immediate presence, it is the meaning, the idea, the final aim, at the same time. The material that doubles up into the spiritual, the sensible into the intelligible, it affects all the senses. Having an eye does not simply mean possessing an organ intended for viewing, it also means having some peculiar social and cultural perspicacity. Equally, having ear does not simply mean possessing some ears, but it involves possessing special musical skills, such as the perfect pitch, or having a particularly developed artistic sensitivity, anyway. Now it will not be surprising that having a nose does not simply mean possessing a nose, but it also means having research and interpretation skills that go beyond the average of other human beings. Maigret undoubtedly has a nose for investigations, and Simenon

insists precisely on this nose as a natural skill that needs no methodical or cultural enhancement. The same goes for taste, which is not only the skill to taste the flavours of food, but also the skill to judge either aesthetic or behavioural issues with a particular competence to be considered as people of good taste. Furthermore, in the specific case of taste, we have the expression "to have taste" as well as "to have pleasure", to have inclination, to be oriented towards some purpose, as to say that we have some aims actively and not only passively disposed, as it should be if it were simply the application of a sensitive provision. There is nothing surprising in observing that even in the case of touch we have a doubling, even more polarised than those we have examined up to now. As Aristotle, with common sense ("common sense"! We shall soon re-

sto a questo dato triviale, a questo senso cieco e tutto tranne che spirituale, si trova che il tatto viene a incarnare la quintessenza delle capacità e delle doti umane. Una persona dotata di tatto – e si noti che solo una persona può avere tatto, non un animale né una macchina – questa persona è in grado di comportarsi con la sensibilità e l'acume sociale adatto alla circostanza. E anche qui è difficile da immaginarsi un animale o una macchina siano dotati di tatto nel senso umanistico del termine. Perché racconto queste storie? Perché, negli umani, il senso è intrinsecamente interdisciplinare, giacché ha a che fare contemporaneamente con il sensibile e con l'intelligibile, con il tecnico e con l'umanistico. Veniamo così alla quintessenza dei cinque sensi, al più interdisciplinare e indisciplinato dei sensi, il sesto senso, che nella tradizione aristotelica indicava la *koinè aisthesis*, ossia un senso condiviso che mette insieme tutti gli aspetti di un'esperienza che per esempio è visiva e uditiva. È a questo punto particolarmente illuminante, a mio avviso, considerare come questi elementi che si riferiscono semplicemente a un sensorio che coordina differenti organi di senso abbiano potuto dar luogo sia alla ordinarietà del senso comune inteso come il buon senso che dovrebbe caratterizzare gli esseri umani educati (ma Cartesio ci ha insegnato quanto sia raro), sia la capacità straordinaria costituita dal sesto senso cioè da quella dote sovraeminente che va al di là delle semplici capacità dell'uomo di buon senso, del *plain man*.

### Il circolo tecnoantropologico

Se dovessimo spiegare il motivo per cui queste parole legate a funzioni sensibili si raddoppiano con tanta sistematicità, e in moltissime lingue, come delle parole spirituali, ciò dipende proprio dalla circolarità fondamentale

turn to it), considers that touch is the most essential, minimal sense for every living being because it could only be destroyed without any touch. We can, in fact, imagine living beings with no eyes, no ears, no smell, but it is very difficult to think that a living being is deprived of touch, and that is for an essential reason, precisely because in the absence of touch, that is, in the absence of that intermediary, which makes us enter in contact with the external world, we could not have any form of existence and, above all, of survival. It is not difficult, in fact, to imagine an animal dying burned for the lack of touch. However, in contrast to this trivial fact, to this blind and anything, but spiritual sense, touch embodies the quintessence of human abilities and skills. A tactful person – and note that only a person can have tact, not an animal nor a machine – can behave

with the sensitivity and social perspicacity suitable to each circumstance. Even here, it is difficult to imagine either an animal or a machine endowed with tact in the humanistic sense of the term. Why am I telling these stories? Because the sense in humans is intrinsically interdisciplinary, since it simultaneously involves both the sensible and the intelligible, both the technical and the humanistic aspect.

Thus, we come to the quintessence of the five senses, to the most interdisciplinary and undisciplined of the senses, the sixth sense, which indicated the *koinè aesthesis* in the Aristotelian tradition, that is a shared sense bringing all the aspects of an experience together, for example, both visual and auditory. Now in my opinion, it is particularly important to consider how these elements, which simply refer to a sensorium that coordinates different sensory

che stiamo prendendo in esame. La circolarità cioè di un organismo, quello umano, che, connesso con altri meccanismi, riceve delle finalità esterne, che non sono più materiali, ma spirituali. Quanto dire che senza un supplemento tecnico è molto difficile che un animale umano possa accedere al livello spirituale. Siamo quello che siamo prima di tutto perché siamo quello che ereditiamo dall'apprendimento e dalla cultura, che a loro volta non sono che la sedimentazione di pratiche tecniche. Quanto dire che l'uomo è l'animale ibrido e interdisciplinare per eccellenza.

Fra tutti i sensi il più rivelativo, non per caso, è il tatto, sia per la sua polarità estrema che unisce il sublime con l'umile, sia per la sua ubiquità fra gli organismi. Ora però emerge un elemento che sembra trasporre nella evoluzione fisiologica il raddoppio che abbiamo descritto nel doppio senso, intellettuale e sensibile, del senso. Dalla membrana esterna degli organismi unicellulari sono derivate sia la pelle sia la materia grigia. Ecco perché non c'è niente di più profondamente superficiale della pelle. E, malgrado le apparenze, gli ambienti virtuali in cui spesso ci immagiamo non sono la mortificazione della pelle, ne sono l'apoteosi, perché, mentre noi, come anime viventi e senzienti, ci immagiamo per poco o tanto tempo in un mondo apparente, l'automa, l'apparato che genera quel mondo, si nutre della nostra pelle, sia esterna sia interna, e acquisisce ciò che una macchina può soltanto imitare, più o meno goffamente ma mai in modo perfetto: la forma di vita umana.

Che nella esteriorità della pelle possa manifestarsi l'espressione dell'interiorità più profonda è una esperienza comune, testimoniata dai rossori, dalle chiazze rosse, dagli sbiancamenti, dai sudori, da tutti quegli atti che lasciano trasparire l'interiorità più profonda nella superficialità più evidente, la nuda pelle.

organs, could have led to both the ordinary of the common sense, meant as the common sense that should characterise well-educated human beings (but Descartes taught us how rare it is), and the extraordinary capacity made up of the sixth sense, that is by that super-eminent skill, which goes beyond the simple abilities of a man of common sense, a *plain man*.

**The technico-anthropological circle**  
If we had to explain why these words linked to sensitive functions double so systematically, and in many languages, like spiritual words, we could say that it depends on the essential circularity we are examining. That is, the circularity of an organism, the human one, which, connected to other mechanisms, receives external purposes, which are not material any longer, but spiritual. It is like saying that it is very difficult for

a human animal to access the spiritual level without a technical supplement. Firstly, we are what we are because we are what we inherit from learning and culture, which are nothing more than the sedimentation of technical practices. It is like saying that man is the quintessential hybrid and interdisciplinary animal.

The touch is, not by chance, the most revealing one of all the senses both for its extreme polarity, which links the sublime with the humble, and for its ubiquity among organisms. Now an element emerges that seems to transpose the dual sense we described in the intellectual and sensitive double sense, into physiological evolution. Both skin and grey matter derive from the outer membrane of unicellular organisms. That is why there is nothing more deeply superficial than skin. Despite appearances, virtual environments, where

Ovviamente si potrà osservare che per avere la manifestazione di un'interiorità occorre possederla. E che quindi quello che stiamo dicendo della pelle vale soltanto per quel meraviglioso essere che riuscito a trasformare la membrana esterna della cellula nella materia grigia che ne definisce le capacità di pensiero. Tuttavia, anche questa descrizione appare un po' avventurosa, e più precisamente presuntuosa.

Perché la materia grigia non è affatto l'esclusiva dell'organismo umano. Ci sono tantissimi organismi dotati di materia grigia, e magari con cervelli più grossi e più performanti dei nostri. Per esempio, i delfini, i quali non solo dispongono di una massa cerebrale maggiore della nostra, ma sono anche capaci di prestazioni invidiabili e a noi inaccessibili, come vegliare con un emisfero cerebrale e dormire con l'altro. Chi non desidererebbe fare qualcosa del genere? Eppure per noi umani non è possibile. Ma se non sono la performance e la dimensione della materia grigia a determinare lo sviluppo di quelle proprietà tipicamente umane che sto descrivendo, e che difettano tanto agli animali non umani quanto agli automi, ci si deve chiedere perché mai ciò sia avvenuto. In altri termini perché i delfini non fanno conferenze sugli umani e gli umani possono parlare di delfini in una conferenza?

La risposta è molto semplice. Perché i delfini sono rimasti in acqua, e in acqua è difficile accendere un fuoco, avviare qualche conversazione intorno al fuoco, iniziare una qualche forma di vita comunitaria che prelude remotamente alla forma di vita umana cioè che prelude remotamente a quell'immancabile accumulo di archivi, registri, strumenti e supplementi che permettono all'umano di essere così diverso e così specifico rispetto all'animale non umano. Affinché la forma di vita umana potesse prendere le dimensioni che ora le sono specifiche, sono state necessa-

we often immerse ourselves, are not the mortification of the skin; they are its apotheosis, because we immerse ourselves in an apparent world as living and sentient souls for a short or long time. In the meanwhile, the automaton, the apparatus generating that world, feeds on our external and internal skin and acquires what a machine can only imitate, in a more or less clumsy way, but never perfectly: the human life form. The expression of the deepest interiority can be shown in the exteriority of the skin. This is a common experience, testified by redness, red spots, whitening from sweat, by all those acts that let the deepest interiority reveal in the most evident superficiality, the bare skin. Obviously, you may observe that you need to possess an interiority to have its manifestation. Therefore, what we are saying about the skin can be confirmed only for that wonder-

ful being that managed to transform the outer cell membrane into the grey matter defining his/her thinking skills. However, even this description seems to be a little bit adventurous, and more precisely overconfident. Grey matter is not exclusive for the human organism. There are so many organisms with grey matter and even with bigger and better performing brains than ours. Dolphins, for example, not only have a greater brain mass than ours, but they are also able to do enviable performances that are impossible for us, such as being awake with one brain hemisphere and asleep with the other part. Who wouldn't do anything like this? Yet, it is impossible for humans. If it is not the performance and grey matter size to determine the development of those typically human skills I am describing, and which both non-human animals and automata lack so

rie quelle che gli antropologi chiamano forme di preadattamento, ossia il crearsi di condizioni che prefigurino uno sviluppo culturale tecnologico simbolico altrimenti irrealizzabile. Ecco perché nelle aule delle nostre scuole e delle nostre università ci sono degli umani che parlano di delfini, e non dei delfini che ragionano sul fatto che gli umani, pur non essendo intelligenti come loro, hanno tuttavia una certa dose di spirito e di cultura.

### **Preadattamento: come si diventa quello che si è**

Esaminiamo rapidamente queste forme di preadattamento, partendo dall'ipotesi che si tratti di un potenziamento tecnico, ed è per questo che per comodità espositiva seguirò il filo conduttore della pelle, ossia della sede del tatto, una pelle che, per quanto ci è dato di sapere, solo nel caso dell'organismo umano è stata trasformata in un apparato tecnologico.

Come? È molto semplice. È difficile immaginare un animale che si copra con una pelle umana o di qualche altro animale, mentre l'immagine più corrente che abbiamo dei nostri remoti progenitori è di umani coperti con delle pelli di animali. Quanto dire che la pelle diviene solo per l'umano un possibile supplemento tecnico. Il motivo di questo è molto semplice. Gli umani hanno origine in Africa, tendono a spostarsi secondo una caratteristica che in ultima analisi è propria dell'umano, la caratteristica voglio dire di non fissarsi in un ambiente determinato, e spostandosi si trovano necessariamente in climi più freddi. L'unico rimedio alla insufficienza organica è produrre un supplemento tecnico. Altre specie sarebbero rimaste nel loro luogo di provenienza oppure avrebbero sviluppato delle forme di adattamento in tempi di milioni di anni.

much, you must ask why this happened. In other words, why don't dolphins give lectures about humans, while humans can talk about dolphins in a lecture? The answer is very simple. Because the dolphins have remained in the water, where it is difficult to light a fire, start some conversation around the fire, start some form of community life that remotely preludes to the form of human life, that is, remotely preludes to that huge number of archives, registers, tools, and supplements that allow the human to be so different and so specific from the non-human animal. You need what anthropologists call forms of preadaptation, that is, the creation of conditions that prefigure a symbolic, technological, cultural development, otherwise impossible, to allow the form of human life to take the dimensions that are now specific to it. That is why in our school and uni-

versity classrooms there are humans who talk about dolphins, and there are no dolphins who reason about the fact that humans have a certain amount of spirit and culture, even if they are not as intelligent as dolphins are.

### **Preadaptation: how you become who you are**

Let us quickly examine these forms of preadaptation, starting from the hypothesis that we are dealing with a technology enhancement, and that is why, for my convenience, I will follow the leitmotif of the skin, the location of touch. As far as we know, such a skin has been transformed into a technological apparatus only for human organisms. How? It is very simple. It is difficult to imagine an animal covered with a human or some other animal skin, while the most current image we have of our remote ancestors is that of humans cov-

La pelliccia e dunque ciò che insieme è testimonianza e possibilità della ubiquità della specie umana. Vale la pena di osservare due circostanze, a questo proposito. La pelliccia, sino a tempi non lontani, costituiva un uno *status symbol*. Poi è invalsa la giusta opinione per cui non si capisce perché si debbano uccidere degli animali per fabbricare pellicce per gli umani. Questa è una forma di civiltà un passo in avanti decisivo che dimostra quanto l'umanità stia diventando più consapevole; ma non dobbiamo dimenticare che se questo passo in avanti ha avuto luogo, e proprio perché i nostri antenati hanno rimediato le proprie insufficienze fisiologiche attraverso supplementi tecnologici come per l'appunto le pellicce. La controprova è evidente: come accennavo poco fa, non troveremo mai un animale non umano proteggersi con la pelliccia di qualche altro animale, il che non significa che questo animale non umano possa commettere degli atti che, dal punto di vista dell'umanità appaiono "bestiali". Va notato d'altra parte che la propensione per il supplemento tecnico nell'umano si è spinta sino ai casi aberranti in cui la pelle umana è stata usata per paralumi o poltrone. In quel caso, chi si è reso responsabile di una simile aberrazione viene definito una "belva umana", che, diversamente dalla tautologia per cui le bestie sono bestiali, indica un radicale disvalore morale, il fatto di essere usciti dall'umanità commettendo un atto che, a rigore, ne è la quintessenza, ossia la creazione di protesi tecniche.

Anche le tende dei primi accampamenti erano spesso fatte di pelle. Qui la protezione non si limita al rimedio contro il clima a livello individuale, ma investe delle possibilità di realizzazione sociale. E infatti la condivisione di una tenda come prima di una caverna che determina il formarsi di clan, di gruppi sociali variamente strutturati, e di luoghi in cui ha luogo la vita

ered with animal skins. It is like saying that the skin is only a possible technical supplement for humans. Its reason is very simple. Humans originate in Africa, they tend to move according to a characteristic that ultimately belongs to humans, I mean the characteristic of not being established in a specific environment, and moving, they necessarily find themselves in colder climates. The only remedy for their organic insufficiency is to produce a technical supplement. Other species would have remained in their place of origin, or they would have developed some forms of adaptation over millions of years. Fur is, therefore, evidence and possibility of the human species' ubiquity. Two circumstances are worth noting in this regard. Until recent times, fur was a *status symbol*. Then the right opinion prevailed: it is not clear why animals should be killed to make fur for hu-

mans. This is a form of civilisation, a decisive step forward, that shows how humanity is becoming more aware; but do not forget that if this step forward took place, it is precisely because our ancestors remedied their own physiological deficiencies through technological supplements, such as furs. The proof is evident. As I just mentioned, we will never find a non-human animal protecting itself with the fur of some other animal, which does not mean that this non-human animal can commit acts that might appear "bestially" from a human point of view. On the other hand, it should be noted that the propensity for the technical supplement in the human being has gone as far as the aberrant cases where human skin has been used for either lampshades or armchairs. In that case, whoever is responsible for such an aberration is defined as a "human beast". Differently from the tautology accord-

comune e insieme si sviluppa quella tendenza, che è caratteristica dell'umano, della capitalizzazione ossia dell'accumulo preventivo di risorse in vista del futuro. Senza depositi per il grano non si vede come possa svilupparsi un'efficiente economia agricola, e quindi anche in questo caso l'apparato tecnico è determinante rispetto all'apparato sociale.

Un altro uso tecnologico della pelle è, per esempio, la pergamena. Ossia un supporto durevole per l'esercizio di quell'altra tecnica di particolare rilievo per l'esistenza umana che è la scrittura. Difficile sottovalutare l'importanza di questo strumento volto a capitalizzare in forma esplicita le esperienze precedenti, perché è solo dal momento in cui la capitalizzazione dell'esperienza può dispiegarsi in tutta la sua efficacia che lo sviluppo naturale dell'umano, non molto diverso in quanto tale da quello di animali non umani, si trasforma in uno sviluppo culturale, ossia in uno sviluppo estremamente più veloce, e dunque anche più conflittuale è più traumatico.

Riflettiamoci un momento. Una rappresentazione futuristica e ingenua degli umani, corrente quando ero ragazzo, ci parlava di un futuro più o meno prossimo in cui gli umani sarebbero stati dotati di corpi mingherlini, perché non più esercitati nella azione fisica, e di teste enormi, perché ormai l'attività fondamentale dell'umano sarebbe consistita nel pensiero. Si tratta di una rappresentazione davvero troppo ingenua sotto molti aspetti. Prima di tutto, perché è assurdo immaginare che mutazioni fisiologiche così importanti possano aver luogo nel giro, poniamo, di un paio di secoli. Non è escluso che fra moltissimi secoli gli orsi bianchi trasformeranno le loro zampe in pinne, aumentando il tempo che passano fuori dal ghiaccio nell'acqua. Ma questo non significa in alcun modo che si tratti di una tra-

ing to which beasts are beastly, it indicates a radical moral disvalue, the fact of having left humanity by committing an act which, strictly speaking, is its quintessence, that is the creation of technical prostheses.

The tents of the early camps were often made of leather, too. Here the protection is not limited to the remedy against the climate at an individual level, but it invests some possibilities of social achievement. In fact, sharing a tent, as well as a cave before, determines the formation of clans, variously structured social groups, and places where common life takes place. At the same time, it developed the tendency of capitalisation, a human being's characteristic, that is the preventive accumulation of resources for the future. It is not clear how an efficient agricultural economy can be developed without any grain warehouses and, therefore, also in this

case the technical apparatus is decisive in comparison with the social one. Another technological use of leather is, for example, parchment. It is the lasting support for the writing exercise, the other particularly important technique for human existence. It is difficult to underestimate the importance of this tool aimed at explicitly capitalising on previous experiences. Only when the capitalisation of experiences can unfold in all its effectiveness, the natural development of the human being, not very differently from the development of non-human animals, changes into a cultural development. It is an extremely faster development and is, therefore, even more conflictual and traumatic. Let's think about it for a while. A current futuristic and naïve representation of humans, when I was a boy, expressed the near future when humans would be endowed with skinny bodies because

sformazione che nel giro di qualche generazione potrà essere osservata e descritta. A maggior ragione questo vale per le ipotetiche trasformazioni dell'umano dipendenti dallo sviluppo delle tecnologie che non richiedono più la forza.

In effetti, e comunque si voglia considerare questa profezia, si è realizzata al contrario, giacché da una parte la scomparsa del lavoro fisico ha aumentato la cura del corpo e l'attenzione per l'esercizio fisico, sicché gli umani contemporanei sono mediamente molto più in forma dal punto di vista corporeo di quanto non fossero i loro antenati, magari deformati da lavori fisici usuranti. Dall'altra è proprio questo movimento umano ad apparire altamente pregiato e desiderabile per la raccolta di dati nel web; e non è un caso che sempre più numerosi siano gli apparati di cui ci dotiamo per poter raccogliere, registrare e capitalizzare i nostri movimenti.

### Il patrimonio dell'umanità Il capitolo attuale e più significativo introdotto dalla tecnica e

dalla rapidità di questa trasformazione, con tutti gli shock e i timori che può generare, è la progressiva tendenza del sistema degli automi del web a impossessarsi della pelle umana. Non si tratta in nessun modo di antropofagia, giacché i computer non mangiano, bensì del fatto che essendo la pelle l'elemento più manifesto del comportamento umano chi avesse accesso alla pelle potrebbe accumulare la più grande quantità di dati sugli umani che si possa immaginare. Consideriamo infatti una serie di fasi evolutive.

In un primo tempo, il computer era un oggetto grosso e non trasportabile. Questo comportava che le eventuali raccolte di dati che piattaforme ai tempi non ancora esistenti avrebbero po-

they did not practise physical exercise any longer, and with enormous heads because by now thinking would have been the essential activity for humans. The picture is too naïve under many aspects. Firstly, because it is absurd to imagine that such important physiological mutations could take place within a couple of centuries. It is not excluded that, in many centuries, polar bears will transform their paws into flippers, increasing the time they spend out of the ice, in the water. Anyway, this does not mean that such a transformation might be observed and described within a few generations. The same goes for the hypothetical transformations of humans, which depend on the development of technologies that do not require strength any longer.

However we might consider this prophecy, the reverse has occurred. On the one hand, the disappearance of physical

work has increased body care and attention for physical exercise, so that contemporary humans are averagely much fitter than their ancestors were, from a bodily point of view, since ancestors may have been deformed by strenuous physical work. On the other hand, it is this human movement that seems to be highly valuable and desirable for Web data collection. Indeed, it is no mere coincidence that we are equipped with an increasing number of devices to collect, record and capitalise on our movements.

#### Common heritage of humanity

The most meaningful chapter introduced by the technique and speed of this transformation, with all the shocks and fears it can generate, is the progressive tendency of the Web automata system to take over human skin. This is not anthropophagy as computers do not eat, but since the skin is

tutto ricavare da questi computer erano molto modeste perché riguardavano soltanto circostanze circoscritte della vita di una persona, e, normalmente, della vita lavorativa di una persona. L'introduzione dei computer portatili e dei social ha incrementato la prossimità perché ha fatto sì che le persone potessero essere connesse in tempi e spazi molto più alti di quelli concessi dai vecchi computer, e soprattutto che le interazioni andassero sempre di meno a insistere sull'attività lavorativa, riferendosi piuttosto all'insieme della attività sociale. Si ponevano qui le basi per la trasformazione per cui gli umani sono attualmente interessanti non più come portatori di capacità lavorativa, in gran parte incorporata dal computer, bensì in quanto espressione puramente umana di che cosa significa la nostra forma di vita. È questo che viene captato dalle piattaforme perché, lo ripeto, le macchine non sanno come funzionano gli umani e devono impararlo da loro. Lo imparano registrandone i comportamenti. In questo quadro, l'introduzione dello smartphone ha costituito un'ulteriore passo in avanti, giacché dotava ogni singolo essere umano di un computer portatile che ne consentiva la geolocalizzazione, l'archiviazione di tutte le comunicazioni, la sostituzione tendenziale di qualunque apparato di registrazione o di consumo per vedere la televisione oppure fare delle fotografie oppure sentire musica; tutto questo avveniva all'interno di un apparato che è nelle tasche di ognuno di noi, e di conseguenza poteva essere registrato.

Che il bisogno fondamentale del web consista nel registrare comportamenti e attività specifiche della forma di vita umana, è provato anche da un'altra circostanza che ritengo più significativa di quanto non si pensi immediatamente: la crescente offerta di assistenti vocali, che risultano, credo, ai più, o almeno

the most evident element of human behaviour, those who have access to the skin could accumulate the largest amount of data on humans, one could imagine. In fact, let us consider a series of evolutionary phases.

At first, computer was a large, non-transportable object. This meant that any data collections, which platforms, that did not exist yet at that time, could get from these computers, were very modest because they only concerned limited circumstances of a person's life, and, normally, a person's working life. The introduction of both laptops and social media has increased proximity by letting people connect in more times and spaces than those granted by old computers and, above all, interactions focused less on work, referring rather to the overall social activity. The transformation was developed, so that humans are currently interesting no

longer as people with working capacity, largely embodied by the computer, but as a purely human expression of what our life form means. This is what can be picked up from the platforms because, I wish to repeat, machines do not know how humans work and must learn it from them. They learn it by recording human behaviour.

In this context, the introduction of the smartphone was a further step forward, since each human being was equipped with a sort of laptop that allowed geolocation, filing of all communications, replacing any recording or consumer device used to watch television, take photographs or listen to music. Everything took place inside a devise we carry in our pockets and could, consequently, be recorded.

The main need of the Web consists in recording specific behaviours and activities of the human form of life. This

sicuramente a me, non necessari e molesti. Perché allora proporli a ogni passo? Per soddisfare la necessità di raccogliere non solo delle tracce scritte, ma anche delle tracce vocali per perfezionare, ad esempio, i sistemi di dettatura.

Un'ultima, o meglio penultima trasformazione, e precisamente l'avvicinamento al corpo dell'apparato meccanico di registrazione è costituita dagli *smartwatch*. Il fatto che lo *smartwatch* sia al nostro polso cioè sia già a contatto con la nostra pelle, fa sì che risulti molto più facile riconoscere dei processi fisiologici, dei comportamenti antropologici e delle forme di vita che aumentano il monte di dati che ogni singolo essere umano connesso fornisce alle piattaforme di registrazione e di capitalizzazione. Questo ovviamente vale anche per la possibilità, che oggi viene prospettata dagli *smartglasses*, di farci accedere a delle realtà aumentate attraverso il semplice uso di questi occhiali, o di fotografare, a loro insaputa, altre persone con il semplice sguardo. Badate bene! Ciò che interessa allo *smartglass* non è l'altra persona (a meno che a usarlo sia un investigatore privato) ma l'interesse che l'altra persona o l'altra cosa suscita in noi. La logica soggiacente a questa evoluzione è molto chiara e si risolve nell'affermazione della necessità di apparati sempre più immersivi. Dove "immersivi" va interpretato come ciò in cui si immerge un corpo umano per lasciare tracce di sé che potranno essere elaborate e modificate per scopi di conoscenza e di capitalizzazione. In questo senso appare profondamente futile la preoccupazione secondo cui la crescita degli ambienti immersivi coinciderebbe con il nostro progressivo transito verso un mondo immaginario o una realtà virtuale. Niente di tutto questo. Da una parte, ben prima del web, l'umano è sempre stato immerso in un mondo virtuale. I nostri pensieri le nostre azioni

is also shown by another circumstance I believe is more significant than one can immediately think: the increasing offer of voice assistants, which seem to be unnecessary and annoying, I think, to most of us, or at least certainly to me. Why do they propose them at every step? In order to satisfy the need to collect not only written traces, but also vocal traces and improve, for example, dictation systems. The last, or rather penultimate transformation, approaching the mechanical recording devise to the body is offered by *smartwatches*. The fact that the *smartwatch* is on our wrist, already in contact with our skin, means that it is much easier to recognise physiological processes, anthropological behaviours, and forms of life that increase the amount of data that every single connected human being provides to recording and capitalisation platforms. Of course, it is effective also for

the possibility currently proposed by *smartglasses*, to let us access augmented realities through the simple use of these glasses, or to take photos of other people with a mere glance, without them realising it.

Be careful! What the *smartglass* is interested in is not the other person (unless a private investigator is using it), but our interest in the other person or the other thing. The rationale underlying this evolution is very clear and is resolved in the growing need for more and more immersive devices. Whereas "immersive" should be interpreted as where a human body is immersed in, to leave traces of itself that may be processed and modified for purposes of knowledge and capitalisation. In this sense, it seems deeply useless to be worried about the growth of immersive environments that would coincide with our progressive transit towards

i simboli i valori che possediamo in noi stessi, le storie, gli dèi, le mitologie familiari sono a tutti gli effetti un mondo virtuale. Una biblioteca come tale è un gigantesco mondo virtuale nel senso che ci mette in contatto con una mediazione simbolica con delle realtà o delle vite scomparse o lontanissime. E quando parliamo con il nostro psicoanalista (di persona o su piattaforma) fluttuiamo nella *onlife* molto più di quando consultiamo il telefonino per sapere qual è il prossimo treno per Milano. Dunque il vero punto non è quello del mondo vero che finisce per diventare una favola, sentenza pronunciata da Nietzsche in un'epoca in cui radio, cinema, televisione e web erano ancora di là da venire. E, se le cose stanno così, il nuovo rischio non consiste nell'essere inghiottiti in un mondo virtuale (Don Chisciotte lo era a tutti gli effetti), bensì nel rilasciare gratuitamente sempre più dati assolutamente reali agli apparati che ci forniscono i loro servizi. Perché il libro che leggevo in analogico e che rischiava di farmi partire per la tangente come Don Chisciotte non lasciava nessun dato al web, mentre la mia lettura di un libro digitale fornisce alle piattaforme un'infinità di informazioni assolutamente vere e spesso ignote a me stesso.

## Il metaverso è introverso

C'è poi ancora un mito da sfatare, quello secondo cui la crescita della automazione ci trasformerebbe in automi. È il mito che vediamo pienamente in atto in film come *Metropolis* di Fritz Lang, opera che risale alle profondità del secolo scorso e dunque si riferisce a delle tecnologie da tempo superate. Effettivamente, quando la tecnologia che si adopera non è sufficientemente evoluta, allora appare del tutto ovvio che si debba far ricorso ad una specie di meccanizzazione dell'umano. Chi leggesse un trattato

an imaginary world or a virtual reality. None of this. On the one hand, before the Web, the human being has always been immersed in a virtual world. Our thoughts, our actions, symbols, and values we possess in ourselves; stories, gods, familiar mythologies are actually a virtual world. A library is an enormous virtual world in the sense that it puts us in contact with a symbolic mediation with some realities, or some lives, that have disappeared, or that are very far away. When we talk to our psychoanalyst (personally or on the platform), we float *onlife* much more than when we consult our mobile phone to find out what the next train to Milan is. So, the real point is not that the real world becomes a fairy tale, a sentence pronounced by Nietzsche in an era when radio, cinema, television, and the Web were still to come. The new risk does not consist in being swallowed up

in a virtual world (Don Quixote was to all intents and purposes), but in releasing more and more absolutely real data for free to the apparatuses that provide us with their services. The analogical book I read, which risked making me go off on a tangent like Don Quixote, did not leave any data on the Web, while the digital book I read provides the platforms with a large amount of absolutely true information, often unknown to myself.

## The metaverse is intverted

Then there is still a myth to dispel, according to which automation growth would transform us into automata. It is the myth that we see fully carried out in films like *Metropolis* by Fritz Lang, a work dating back to the depths of the last century, which, therefore, refers to long-outdated technologies. When the technology used is not evolved

di arte militare del Settecento ci riconoscerebbe un sistema volto a trasformare i soldati in pezzi di un grande ingranaggio capace di svolgere con precisione le manovre richieste.

Lo stesso vale per il fordismo, che accresce il rapporto uomo macchina con la variante significativa che rende più facili, e dunque anche più noiosi e alienanti, i compiti assegnati all'umano. Fin qui dunque l'evoluzione della tecnologia impone un'automazione dell'umano. Ma quando la tecnologia evolve al punto da surrogare l'umano in funzioni che non riguardano semplicemente la forza o la precisione, ebbene in questo momento diventa prioritario far sì che l'umano sia sempre più umano. Non per filantropia ma, diciamo così, per filantrosopia. L'umano interessa in quanto umano e per nessun altro motivo perché per l'appunto le macchine non sanno come si comportano gli umani; sono talmente raffinate da poter registrare i loro comportamenti e dunque devono imparare dagli umani. La cosiddetta *gamification* è da questo punto di vista illuminante perché evidentemente il principio di Schiller secondo cui l'uomo è veramente uomo solo quando gioca trova nella *gamification* una realizzazione impensata. Effettivamente, se vogliamo capire come si comportano gli umani, dobbiamo coglierli molto meno nelle attività in cui agiscono per dovere che non nelle attività in cui agiscono per piacere. Il gioco diventa dunque un informatore su che cosa è fatto un umano e quale siano le sue preferenze e i suoi interessi, molto più forte di quanto non sia per esempio il lavoro.

## Metafisica e metaverso

Da questo punto di vista, e per concludere le peripezie della pelle, conviene osservare che il metaverso sta cercando di el-

enough, they must obviously resort to a kind of human being's mechanisation. Anyone reading an eighteenth-century treatise about military art would recognise a system aimed at transforming soldiers into pieces of a large mechanism able to carry out the required manoeuvres precisely. The same goes for Fordism, which increases the man-machine relationship with the meaningful variant that makes the tasks assigned to humans easier and, therefore, more boring and alienating, too. Up to now the evolution of technology imposes the human being's automation. When technology evolves to replace the human being in functions that do not simply concern strength or precision, it becomes a priority to ensure that the human being is increasingly human. We shall say not for philanthropy, but for 'philanthrosopy'. The human being is interesting

as a human, and for no other reason, because machines do not know how humans behave. The machines are so refined that they can record human behaviours and, therefore, they must learn from humans.

The so-called *gamification* is enlightening from this point of view because obviously Schiller's principle, according to which man is truly a man only when he plays, finds an unexpected self-realisation in gamification. Indeed, if we want to understand how humans behave, we must grasp them much less in the activities where they act for duty than in the activities where they act for pleasure. So, gaming becomes an informer about what a human being is made of, and what his preferences and his interests are, much stronger than work.

## Metaphysics and the metaverse

From this point of view and in order to

borare sempre più efficacemente l'idea di una seconda pelle da attribuire agli umani. Questa seconda pelle di uno spessore minimo di 3 mm avrebbe la caratteristica di far percepire come reali le esperienze di coloro che sono posti in un ambiente virtuale: toccare un oggetto nel mondo virtuale equivalebbe ad avere le stesse sensazioni tattili che si possono avere a toccare un oggetto nel mondo dell'esperienza ordinaria. L'aspetto davvero interessante, anche in questo caso, non è tanto il fatto che si possono avere delle esperienze simulate altrettanto dettagliate e accurate quanto le esperienze reali, bensì piuttosto il fatto che questa seconda pelle consentirebbe alla piattaforma di acquisire letteralmente tutto di noi. Se già semplicemente un orologio al nostro polso può sapere molto sul nostro corpo possiamo immaginarci l'infinita quantità di conoscenze che potranno derivare da un apparato capace di registrare ogni singolo movimento della pelle, e soprattutto le emozioni le aspettative e i comportamenti di coloro che sono inseriti all'interno dell'apparato immersivo.

In questo senso, Metaverso, considerato spesso, e a torto, come la transizione verso il postumano o l'inumano, è una possibile proposta (orientata da interessi commerciali) di realizzazione completa della forma di vita umana, che è quella di un organismo sistematicamente connesso con un meccanismo. Non c'è niente di più umano di uno *smartwatch* che insieme misura quella funzione squisitamente umana (ma non per questo soggettiva) che è il tempo e insieme registra e capitalizza i nostri spostamenti, i nostri interessi, i nostri ritmi biologici. Come umani, non siamo mai stati così importanti. L'essenziale è che ce ne rendiamo conto, e l'interdisciplinarità di fronte alle sfide globali è la nostra leva, o clava, o penna, o web.

conclude the vicissitudes of the skin, it should be noted that the metaverse is trying to process more and more effectively the idea of a second skin to be attributed to humans. This second skin with a minimum thickness of 3 mm would have the characteristic of letting the experiences of those placed in a virtual environment be perceived as real: touching an object in the virtual world would be the same as having the tactile sensations we have when touching an object in the world of ordinary experience. The interesting aspect, even in this case, is not that we can have simulated experiences as well detailed and accurate as real experiences, but that this second skin would allow the platform to literally learn everything about us. If just a watch on our wrist can already know a lot about our body, we can imagine the infinite amount of knowledge that can derive from an apparatus, which can

record every single movement of our skin, and above all emotions, expectations, and behaviours of those who are immersed in the immersive apparatus. In such a sense, the Metaverse, often and wrongly considered as the transition towards either post-human or inhuman, is a possible proposal (oriented by commercial interests) for the complete realisation of the human form of life, which is that of an organism systematically connected to a mechanism. There is nothing more human than a smartwatch that measures time, a distinctively human (but not subjective) function, and records and capitalises on our movements, our interests, our biological rhythms, at the same time. As humans, we have never been so important. The main thing is that we can realise it, and interdisciplinarity to face global challenges is either our lever, or club, or pen, or the Web.

Paolo Tombesi, <https://orcid.org/0000-0001-8817-3931>

Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland

paolo.tombesi@epfl.ch

### Tecnologia in quanto metodo di analisi

Se da una parte è inevitabile porsi delle domande sul ruolo della tecnologia nella costruzione, oggi questo equivale anche ad interrogarsi sul significato della parola stessa, nonché della sfera disciplinare di appartenenza. Nell'accezione anglofona e sassone, da cui deriva molta manualistica di riferimento, il termine è ancora prevalentemente utilizzato, tout court ed ecumenicamente, per descrivere l'insieme dei mezzi e metodi della costruzione, ovvero le tecniche di produzione, assemblaggio e funzionamento dei componenti dell'organismo edilizio, di solito senza riferimenti esplicativi alle manifatture di provenienza o al loro livello di avanzamento. Più in generale, è il cono visivo degli studi sulla costruzione che sembra attestarsi su questa lettura, privilegiando la doppia connotazione materiale e immediatamente strumentale di 'tecnologia', indipendentemente dalla scala applicativa o dal grado di articolazione interno del sistema di lavoro corrispondente.

Viene da chiedersi, però, se l'identificazione della tecnologia con insiemi di tecniche per definizione aprioristiche rispetto al progetto e tutto sommato autoreferenziali sia funzionale alle sfide odierne della costruzione nonché ai compiti di coloro chiamati a gestirla ed indirizzarla. In un contesto come quello globale attuale, in cui l'attività edilizia è tanto importante dal punto di vista dello sviluppo socio-economico quanto critica da quello delle pressioni ambientali indotte, una domanda sorge infatti spontanea: è possibile rimanere ancorati ad una visione essenzialmente positivista della tecnologia – risposta diretta a serie di esigenze produttive scorporate da esiti che vadano oltre il manufatto edilizio in sé – oppure è necessa-

rio pensare alla possibilità di allargarne i confini concettuali, che la facciano diventare metodo di analisi e di riflessione più generali? In questo senso sembra utile soffermarsi sulle sue due componenti etimologiche – *tekne* (tecnica) e *logos* (discorso), ponendo però l'accento sulla seconda piuttosto che sulla prima. In tal modo, tecnologia verrebbe a significare, anche retoricamente, 'riflessione sulla tecnica'; il che, in uno scenario produttivamente avanzato, cioè con una molteplicità di tecniche a disposizione, avvicinerebbe molto la natura di tale riflessione ad una definizione classica di 'economia', più precisamente quella avanzata dall'inglese Lionel Robbins nel 1932 – "la scienza che studia il comportamento umano in quanto relazione tra fini e mezzi limitati che hanno usi alternativi" (Robbins, 1932). Una tale sovrapposizione lessicale renderebbe perfettamente conto di una possibile, importante missione della tecnologia in quanto disciplina al giorno d'oggi, e cioè lo studio per una gestione efficace delle materie utilizzabili per costruire, non solo dal punto di vista edilizio ma anche da quello ambientale ed industriale. Di fatto, il considerare la giustapposizione di tali materie 'economicamente', in quanto risorse, produttrici di beni o portatrici di esternalità, potrebbe generare valutazioni realmente complesse della produzione a queste collegate, riguardanti l'oggetto costruito nella sua interezza storica, non solo in quanto fine naturale ma anche in quanto mezzo (o causa) per l'ottenimento di risultati altrettanto decisivi in contesti altri. La questione, a questo punto, è di metodo: esiste una base epistemologica appropriata per provare a fare questo? Se sì, quali sono le sue unità conoscitive di base?

### TECHNOLOGY AS A DISCOURSE ON METHOD AND ON DESIGN

#### Technology as method of analysis

Although it is perhaps inevitable, prodding the role of technology in construction today may lead one to question the very meaning of the term – technology – as well as the disciplinary sphere it belongs to. Within English-speaking and German cultures, from which many of the reference literature manuals originate, the word is still prevalently used, *tout court* and ecumenically, to denote the ensemble of construction means and methods, i.e. all the techniques employed to produce, assemble and operate the components of the building organism. By-and-large without paying explicit reference to their supply chains or their degree of sophistication. More in general, it is the cone of vision of construction studies that seems to favour this view by privileging the double material and straight-out in-

strumental connotation of technology, irrespective of its applicative scale or the internal degree of articulation of the associated system of production. However, today it seems appropriate to ask if the identification of technology with sets of techniques by definition preceding and autonomous from project design, and self-referential after all, is functional to construction's contemporary challenges or the tasks of those in charge of managing and steering it. In a context such as the current global one, where building activity is as important to socio-economic development as it is critical in terms of the environmental pressures it induces, a question arises naturally: is it still possible to remain attached to an essentially positivist vision of building technology – inasmuch as direct response to production needs disconnected from any outcomes reach-

ing beyond the building artefact per se – or is it necessary to broaden its conceptual boundaries so as to turn it into a more general method of analysis and reflection? To this end, it seems useful to consider its two etymological components – *tekne* (technique) and *logos* (discourse), and place the emphasis on the latter rather than on the former. This way, technology would end up meaning, both literally and rhetorically, 'reflection on technique', which, in an advanced production scenario – with a plethora of techniques available – would make the nature of such reflection come very close to one of the classic definitions of 'economics', notably that offered by the British Lionel Robbins in 1932 – "the science which studies human behaviour as a relationship between ends and scarce means which have alternative uses" (Robbins, 1932). Such a lexical mix

## Il progetto edilizio come base e tipo ideale

di per se, un'affermazione eclatante. È vero però che il rapporto tra progetto tradizionale e tecnologia non viene solitamente privilegiato nell'analisi della seconda, proprio in virtù dell'unicità realizzativa del primo, e quindi della sua supposta mancanza di generalizzabilità. La cosa cambia, però, prendendo a prestito le intuizioni del sociologo Max Weber (1864-1920) sulla nozione di 'tipo ideale' (Weber, 1949) e adattandole alla nozione di tecnologia suggerita nella sezione precedente. Se fare tecnologia vuol dire riflettere sulla combinazione di tecniche, il progetto diventa forzatamente il fulcro aggregativo di tutte quelle necessarie al suo sviluppo, assumendo quindi una funzione di catalizzatore dalla quale non ci si può esimere per valutare l'efficacia 'organica' delle decisioni prese (quindi ovviamente delle tecniche adottate). Come dimostrato dagli esperti in scienze della complessità, la caratterizzazione di un processo produttivo attraverso un numero sempre maggiore di elementi distintivi finisce per determinarne la rappresentatività rispetto all'ecosistema di appartenenza. Per capirci, se associamo la selezione di un sistema di pannellatura montata a secco ad un progetto specifico, non possiamo trarne grandi insegnamenti rispetto al contesto; ma se a questo aggiungiamo, per dire, informazione rispetto alla forza lavoro, macchine di sollevamento, tipologie abitative, strategie di isolamento ambientale e obblighi manutentivi, allora arriviamo ad un insieme di tecniche la cui selezione combinata fa del progetto un plausibile tipo ideale della situazione industriale esistente, riducendo la possibilità di arbitrio nelle scelte combinatorie esaminate.

would perfectly render a possible, important mission of technology as a discipline today, and that is the study of the efficient management of building materials, not simply from a construction perspective but also from environmental and industrial ones. Indeed, considering the juxtaposition of such materials 'economically', as resources, producers of durable goods, bearers of externalities, could generate truly complex evaluations of the connected production, concerning the built object in its historical entirety, not only as natural end of the application of technology but also as means towards (or cause for) the attainment of equally decisive results in other contexts. The issue, at this point, is one of method: does an appropriate epistemological base exist to try and do it? If so, what are its fundamental knowledge gathering units?

Che il progetto faccia da nucleo operativo fondamentale dell'industria edilizia non costituisce,

La disposizione del progetto ad essere letto tecnologicamente in questo modo è facilmente dimostrabile attraverso degli esempi correnti.

## Tecnologia come ragionamento sugli assi di collaborazione

Il primo è quello relativo alla definizione degli assi di collaborazione, cioè quegli assi privilegiati di intesa tra attori diversi del processo edilizio che determinano alleanze di 'push-and-pull', vale a dire coalizioni di lavoro dove tutti hanno interesse ad introdurre la stessa soluzione tecnica. È facile dimostrare che al progetto afferiscono quattro dominii decisionali: quello relativo alla forma, quello relativo al processo di trasformazione o assemblaggio, quello relativo alle prestazioni richieste, e quello relativo ai materiali e componenti utilizzati. In condizioni normali, ognuno di questi dominii è controllato per definizione da una determinata componente industriale con investimenti ed interessi precipui in materia: professionisti per la forma, costruttori per il processo, fornitori per i materiali, e utenti (e/o ricercatori) per la definizione delle prestazioni. L'adozione di una qualsiasi tecnica funzionale alla realizzazione del progetto dipende dai vantaggi ascrivibili ad ognuno di questi blocchi, nonché dalla loro capacità a far prevalere o ad adattare la propria posizione nel caso in questione. L'ipotesi è quella che ogni mercato della costruzione, in termini geografici o di specializzazione del prodotto, risponda a dei rapporti di potere specifici tra le quattro componenti (qui semplificate ma suscettibili di articolazioni molto più cogenti), e che questa gerarchia determini la natura delle tecniche privilegiate nello sviluppo del progetto. Per fare un esempio, in caso di edifici generici a

### The building project as base and ideal type

To say that projects provide the basic operative kernel of the building industry does not constitute, by itself, a ground-breaking statement. It is true, however, that the relationship between projects as conventionally thought of and technology is not usually privileged in the analysis of the latter, exactly in light of the production uniqueness of the former and, thus, their evident lack of generalisability. Things change, though, if we borrow the insights behind the notion of 'ideal type' as proposed by the sociologist Max Weber (1864-1920), and adapt them to the notion of technology suggested in the previous section. If 'technologising' means reflecting on the combination of techniques, then the building project becomes *de facto* the aggregative fulcrum of all those neces-

sary to its development, hence taking on a catalyst function which cannot be ignored when assessing the 'organic' efficacy of the very decisions made (and thus the techniques chosen). As demonstrated by experts in complexity science, the characterisation of a production process through an ever increasing number of distinctive elements ends up determining its ability to represent the original ecosystem. To clarify, if we associate the selection of a dry-assembled panelised system to a specific project, we may not be able to draw much information about the context; but if we add information concerning, say, labour force structure, lifting equipment, residential typology, strategies of environmental insulation, and maintenance norms, then we reach a cluster of techniques, the conjoined selection of which reduces the chance of arbitrariness in

the combinatory choices examined, thus making the project a plausible ideal type of the existing industrial situation.

The feasibility of technologically reading the building project this way can be demonstrated with practical examples.

### Technology as reflection on collaboration axes

The first example is related to the definition of collaboration axes, i.e. the axes of privileged agreement between different actors with the building process, which determine 'push-and-pull' alliances, or work coalitions wherein all the participants have an interest in introducing the same technical solution. It is not difficult to prove that four decision-making domains are at work within the building project: one related to form; one related to processes of material transformations

01 | Le quattro componenti dell'ecosistema 'costruzione' (a sinistra), con gli assi 'naturali' di collaborazione per interventi a basso costo o speculativi, e per interventi a forte contenuto simbolico o di grande valenza architettonica (a destra). Nel primo caso è il gestore della costruzione a controllare il processo; nel secondo caso il progettista. (Materiale preparato per il corso *Technologie du Bâti V*, EPFL, 2020)

The four components of the ecosystem 'construction', with the 'natural' axes of collaboration for low-cost or commercial projects (left), and for projects with high symbolic content or architectural value (right). In the first case, it is the construction manager that controls the process; in the second, it is the designer. (Documentation prepared for the subject *Technologie du Bâti V*, EPFL, 2020)

basso costo o speculativi, l'asse decisionale tecnico naturalmente da privilegiare è quello che unisce processo di assemblaggio e materiali; forma e prestazione sono una conseguenza di scelte a monte. Nel caso di edifici istituzionali a forte valenza simbolica (e disponibilità di capitale) sono di solito tecniche collegate alla forma e prestazioni associate a prevalere, cui devono adattarsi processi realizzativi e scelta dei materiali o dei sistemi. Si potrebbe continuare con altri esempi sempre più idiosincratici e precisi, ma il senso non cambia (Fig. 1).

Questa semplificazione è utile 'tecnologicamente' per diverse ragioni. In primis perché rende immediatamente tangibili le fondamentali differenze operativo-ideologiche tra sottosectori della costruzione – raramente discusse nelle loro valenze tecniche. In secondo luogo perché ci permette di apprezzare a priori la probabilità che determinate decisioni tecniche vengano adottate o sviluppate appieno all'interno di un progetto, non solo in relazione al contesto industriale ma anche all'esperienza presumibile degli attori coinvolti. Si può anche fare il ragionamento

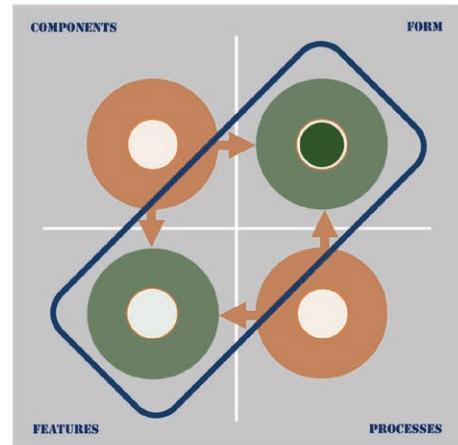
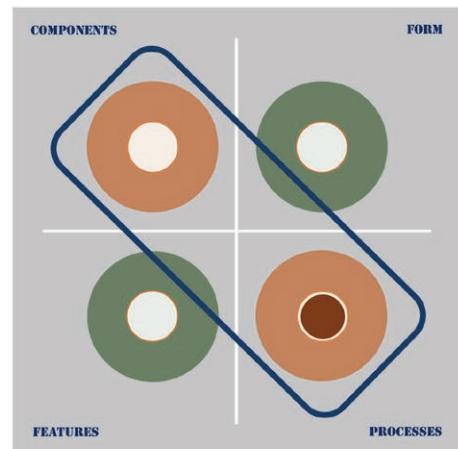
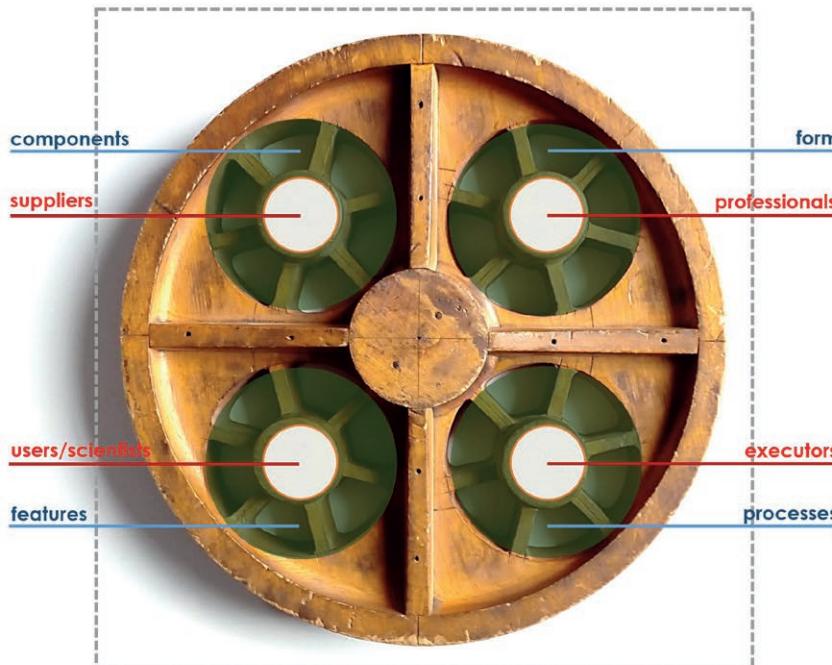
inverso. Nel caso in cui si volessero privilegiare delle collaborazioni specifiche, è necessario identificare le tecniche vantaggiose a tale collaborazione. Se poi si volessero raggiungere determinati risultati, è bene selezionare sul mercato attori adusi al lavoro richiesto nonché alle collaborazioni industriali implizite.

### Tecnologia come messa a punto della matrice socio-tecnica del progetto

Ovviamente il successo di una coalizione tecnica dipende anche dal modo di definire e portare avanti la divisione sociale del lavoro al suo interno. In questo senso, la caratterizzazione macro-industriale appena avanzata – professionisti, costruttori, fornitori e pianificatori – ha bisogno di una granularità più spinta, che renda conto tanto del tipo di sforzo lavorativo che dell'intensità necessaria, soprattutto in relazione al lavoro svolto dagli altri.

Per inquadrare ciò, supponiamo che di un progetto completamente riuscissimo a tracciarne la storia (attraverso disegni, corri-

01 |



spondenza, contratti, registri di cantiere, testimonianze orali), e fossimo quindi in grado di individuare sia le decisioni che le azioni conseguenti (vale a dire l'abaco delle scelte) nei vari ambiti (programma, forma, prestazioni, materiali, erezione, manutenzione, eccetera). In questo caso potremmo valutare (ovviamente in chiave euristica) tanto il grado di unicità di tali azioni rispetto alla pratica corrente (indici di innovazione), quanto la loro incidenza sul sistema di lavoro complessivo del progetto (indici di impatto). A quel punto, potremmo guardare al risultato raggiunto da tali scelte rispetto ad obiettivi precisi (gestione di cantiere, amministrazione di contratti, controllo dei tempi, assicurazione della qualità, montaggio, e via discorrendo), riconoscendo, sulla base empirica del lavoro svolto, le responsabilità dei vari attori coinvolti nel processo decisionale (Tombesi, 2008; 2012).

Il quadro così delineato si presta a molte domande, rispetto per esempio alla necessità di innovare in determinate aree piuttosto che altre, all'intensità ed impatto di alcune dimensioni di lavoro, alla distribuzione e frequenza degli attori nella matrice delle scelte e nel loro successo, e così via. Il valore di questo tipo di analisi è nella sua capacità a rilevare schemi ricorrenti e differenze. Sarebbe illuminante, per esempio, studiare caratteristiche e coefficiente di ripetitività della stessa matrice nei lavori pubblici dell'architetto Calatrava in giro per il mondo; oppure la differenza tra la matrice di questi lavori e quelle risultanti dallo sviluppo dei progetti finanziati dalla lotteria inglese, molto attenta agli aspetti pianificatori e procedurali. O, ancora, la differenza tra la matrice di un progetto pubblico in un contesto economicamente avanzato e dello stesso tipo di progetto in condizioni di sottosviluppo economico.

or assembly; one related to expected performance; and one related to materials and components in use. Under normal conditions, each one of these domains is controlled by definition by an 'industrial block' with specific investments and interests in the matter at hand: professionals for the form, contractors for the process, suppliers for materials, and users (or researchers) for performance. The adoption of whichever technique is functional for the project's implementation depends on the advantages ascribable to any of these blocks, as well as on the latters' ability to make their respective positions prevail or adapt in the case in question. The idea is that every construction market, be it geographic or product specialisation-related, entails specific power relationships between the four components (here simplified but open to much more detailed

considerations). Such hierarchies determine the nature of the techniques to be favoured in the development of the project. To give an example, in the case of generic, price-sensitive or speculative buildings, the technical decision-making axis naturally to be privileged is the one connecting assembly process and materials. Indeed, form and performance are the consequence of these prior fundamental choices. In the case of institutional buildings with strong symbolic connotations (and capital availability), techniques associated with form or eventual performance are more likely to prevail, with the selection of building processes and materials/systems following suit. One could continue with other examples, ever more idiosyncratic and precise, but the meaning remains the same (Fig. 1). This simplification is 'technologically'

Già questo tipo di conoscenza 'sottocutanea' delle strutture gestionali del progetto ha un suo valore nel creare consapevolezza critica rispetto all'applicazione sociale della tecnica. Ma è il passo successivo ad affermarne l'importanza teorica. Un'analisi di questo tipo, infatti, permette almeno di dedurre, ed eventualmente risalire alle cause contestuali dei modelli di comportamento rilevati, rendendo possibile, quando necessario, la messa in cantiere di politiche correttive.

### **Tecnologia come analisi geografica dei fattori di produzione**

Per quanto collegate all'idea di contesto, le linee di analisi tecnologica accennate non entrano direttamente nel merito del consumo di risorse generato dalle scelte di progetto. A pensarci, però, la base di dati necessari a definire la matrice di cui sopra può essere utilizzata per comporre l'atlante di approvvigionamento dei fattori di produzione che convergono sul cantiere. Questo è un modo efficace per visualizzare e valutare le dinamiche di impatto ambientale del progetto effettivo, collegandole comunque tanto alle decisioni prese che alla struttura industriale sul territorio. Immaginiamo infatti che per tutti i componenti di un progetto si possano stabilire le distanze tra luogo di estrazione delle materie prime e posa in opera finale, designando altresì le modalità di trasporto, la geografia degli stadi di trasformazione, la quantità di manodopera richiesta nelle varie fasi, la logica di acquisizione, nonché la posizione nel percorso critico del cantiere (Fig. 2). Seguendo questo schema otterremmo una cartografia esplicativa di un'eventuale analisi del ciclo di vita (certamente con i suoi apporti alle emissioni di anidride carbonica e al consumo di energia grigia) che però, a dif-

useful for several reasons. Firstly, because it makes the fundamental operational-ideological differences that exist between construction sub-sectors, which are rarely discussed in their technical dimensions, immediately tangible. Secondly, because it enables us to evaluate, beforehand, the probability that certain technical decisions will be adopted or fully developed within a given project, not only in relation to the industrial context but also in relation to the experience of the actors involved. We can also reverse the argument. If we wanted to favour specific types of collaborations, we should first identify the techniques advantageous to such collaborations. If we then wanted to accomplish specific results, we should select on the market actors used to the work demanded as well as to the implicit industrial collaborations.

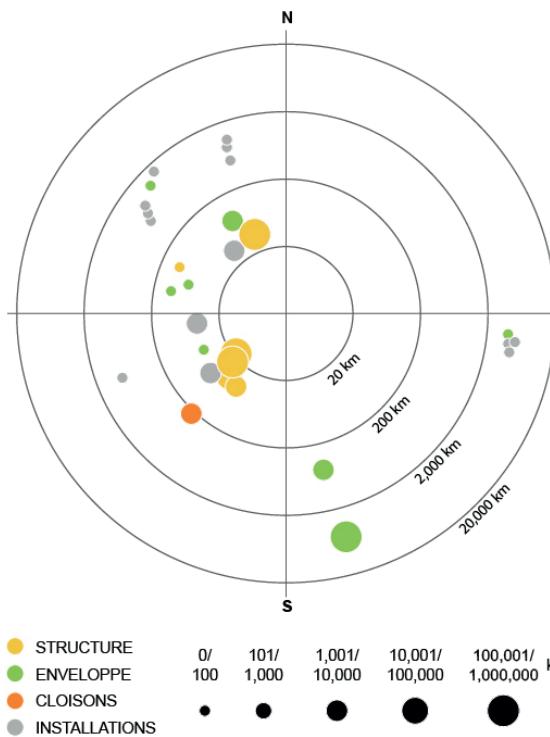
### **Technology as setup of the socio-technical matrix of the project**

Obviously, the success of a technical coalition also depends on how the social division of labour is defined and carried out within it. In this sense, the macro-industrial characterisation just introduced – professionals, contractors, suppliers and planners – needs a higher degree of granularity, conveying both types of work efforts and their required intensity, particularly in relation to the work done by others. To imagine this, let us suppose that, for a given project, we can map out the history (through drawings, correspondence, contracts, site memos, oral testimonies), and are thus capable of identifying the decisions made as well as the consequent actions (that is, the abacus of choices). In this case we could evaluate (evidently heuristically) the degree of uniqueness of such

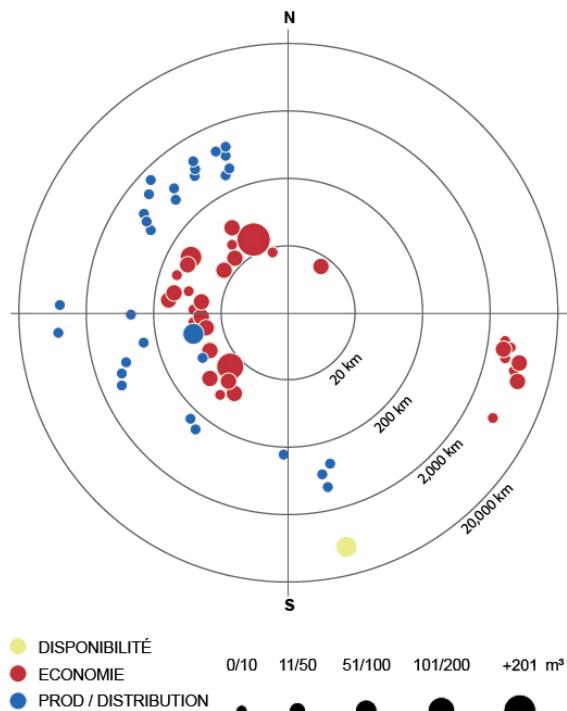
02| Geografia dei materiali utilizzati nella costruzione del padiglione Australiano alla Biennale di Venezia (DCM, 2015), con il cantiere idealmente al centro del diagramma e quattro fasce logaritmiche di distanza ad indicare la laguna (20km), il Nord-Est (200km), l'Europa (2,000km) e il mondo (20,000km). La distribuzione dei materiali sul territorio segue la posizione cardinale in relazione al cantiere. Il primo diagramma riporta divisione per sistemi principali e pesi; il secondo volumi e logiche di approvvigionamento; il terzo stati di arrivo a pié d'opera; il quarto incidenza della forza lavoro sul cantiere. (Materiale preparato per il corso *Technologie du Bâti VI*, EPFL, 2021)

Geography of the materials used in the construction of the Australian pavilion at the Venice Biennale (DCM, 2015), with the site ideally at the centre of the diagram and four logarithmic distance bands indicating the lagoon (20km), the North-East (200km), Europe (2,000km) and the world (20,000km). The distribution of materials over the territory follows their cardinal position in relation to the site. The first diagram reports materials' subdivision by main systems and their weight; the second indicates volumes and procurement logics; the third differentiates between materials' states of arrival on site; the fourth incidence of the labour force. (Documentation prepared for the subject *Technologie du Bâti VI*, EPFL, 2021)

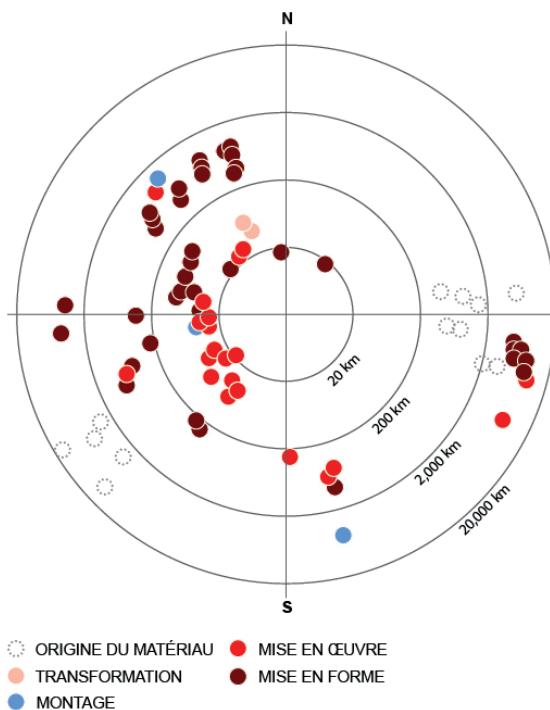
## 02 | SYSTÈMES ET POIDS



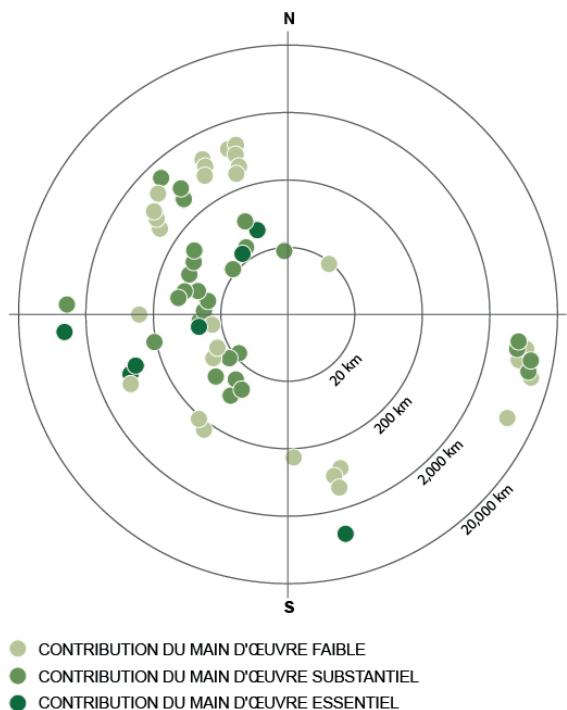
## LOGIQUES ET VOLUMES



## OPÉRATIONS ET CHAÎNE



## TRAVAIL



ferenza delle solite tabelle di calcolo, ci permetterebbe di entrare nel merito delle scelte ‘tecnico-territoriali’. Perchè quel materiale da quel luogo? Perchè quel metodo di montaggio? Perchè quella finitura? Perché quel sistema? In questo caso, la geografia diventerebbe non solo la base per una riflessione sulle conseguenze della progettazione ma anche la documentazione fisica di un’organizzazione industriale e dei mercati da questa determinati. Per esempio, uno studio condotto dal mio laboratorio ha concluso che la differenza tra l’atlante produttivo di una piccola scuola elementare in Svizzera e di una in Portogallo, entrambe con filiere di approvvigionamento molto locali, consiste nella maggiore contiguità geografica e socioeconomica della prima ai produttori di impiantistica avanzata (e quindi ai loro indici dei prezzi) nonché all’utilizzazione di sistemi prefabbricati di struttura e di facciata. All’interno di un raggio chilometrico ancora più ridotto, la scuola portoghese fa uso molto maggiore di semilavorati finiti in cantiere (Fig. 3). Come nella sezione precedente, c’è un modo *ex-post* ed uno *ex-ante* di relazionarsi a questa informazione. Possiamo semplicemente recepirla per capire meglio il progetto e le sue variabili produttive, oppure possiamo utilizzarla per leggere il territorio e valutarne le esigenze di strutturazione futura rispetto alla domanda edilizia stimata o ipotizzata.

### Tecnologia come valutazione delle alternative

del progetto che è proprio degli studiosi della tecnica. Anzi, lo stesso tipo di ragionamento e di informazione di cui sopra può

actions vis-à-vis current practice (innovation indexes), as much as their incidence on the overall system of work in the project (indexes of impact). At this point, we could look at the results obtained by the choices in question against precise indicators (site management, contract administration, schedule control, quality assurance, assembly, etcetera), whilst acknowledging, on the empirical basis of the work carried out, the responsibilities of the actors involved in the decision-making process (Tombesi, 2008; 2012). The framework thus defined lends itself to multiple questions, concerning, for example, the need to innovate in certain areas rather than others, the intensity and impact of certain dimensions of work, distribution and frequency of the actors in the matrix of choices and their success, and so forth. The value of this type of analysis is in

its capacity to survey and detect recurring patterns and differences. It could be enlightening, for instance, to study characteristics and repetition coefficient of the same matrix in the public works developed by architect Calatrava around the world; or the difference between the matrix of such works and those coming out of the development of projects financed by the British lottery, very strict when it comes to the planning and procedural aspects of the work. Or else, the difference between the matrix of a public project in an economically advanced context and that of the same type of project under conditions of economic underdevelopment. This type of ‘subcutaneous’ knowledge of project management structures already has a value in creating critical awareness with respect to the social application of techniques. But it is the next step that affirms its

Va detto che la valorizzazione di questa prospettiva allargata non significa rinunciare allo scrutinio tettonico del tessuto

servire a collegare tecnica delle costruzioni, disegno architettonico e valutazione di impatto ambientale, entrando addirittura nel merito delle scelte linguistiche. Prendiamo un esempio piccolo ed eclatante ma per questo chiaro: il recente padiglione australiano alla Biennale di Venezia (2015), caratterizzato dal forte sbalzo strutturale della sala espositiva prospiciente il rio che attraversa il parco. Qui ci si può soffermare tecnicamente sulla struttura mista in calcestruzzo ed acciaio che definisce la scatola, oppure sulla stratigrafia della doppia parete dell’involturo. Ma si può anche entrare nella dimensione tecnologica discussa fino ad adesso soffermandosi, per esempio, sulle quantità di risorse utilizzate per le varie parti dell’edificio, con l’eventuale riscontro in emissioni. Qui la parte del leone la fanno i micropali di fondazione in calcestruzzo, con un altezza interrata di 18 metri per un volume espositivo di 7, resi necessari dallo sbalzo in facciata date le condizioni del terreno paludare (Fig. 4).

Questo dato, ineccepibile se considerato strutturalmente, diventa un elemento di riflessione se considerato nell’insieme del progetto come parte dell’ambiente ed intervento su di esso. Che valore ha lo sbalzo architettonico rispetto al suo contributo al riscaldamento climatico? Quali avrebbero potuto essere le alternative statiche, compositive ed energetiche, anche all’interno del vocabolario dei progettisti incaricati? Le domande, due tra molte, sono ovviamente pleonastiche, data la dimensione infinitesimale della questione nel caso specifico. Ma diventano fondamentali se integrali all’etica operativa di ogni progetto sul territorio, che però, per affermarsi in quanto tale, ha bisogno di basi teoriche.

theoretical relevance. Such an analysis, in fact, enables one at least to deduct, and eventually trace back, the contextual causes of the behavioural patterns recorded, thus making it possible, when and if needed, to implement adjustment measures.

### Technology as geographic analysis of the factors of production

Their connection with the idea of context notwithstanding, the lines of technological analysis suggested thus far do not directly enter the discussion of the consumption of resources generated by project-related choices. Thinking about it, though, the database required to define the previous matrix can be used to compose the atlas describing the procurement geography of the factors of production converging on the construction site of the project. This is an efficient way to visualise and evaluate

the dynamics of environmental impact of the actual project, by connecting them to the decisions made at project level as well as the industrial structure at territorial level. Let us imagine, in fact, that for all the components of a building project we can calculate the distances between sites of extraction of the raw materials and final assembly on site, also designating the modes of transport, the geography of transformation stages, the amount of labour force required in the various phases, the acquisition rationale of materials and components and, last but not least, their position in the critical path of the construction site (Fig. 2). By following this scheme we would obtain a cartography explicative of an eventual analysis of the building’s life cycle (certainly with its contributions to CO<sub>2</sub> emissions and grey energy), which, however, and unlike the usual calcula-

03| Origine geografica dei materiali utilizzati nella costruzione della scuola elementare di Orsonnens in Svizzera (TEd'A, 2014) e in quella di Matosinhos in Portogallo (aNC, 2013), organizzati per sistemi principali della costruzione e per pesi. L'organizzazione dei diagrammi segue quella indicata nella figura 2. (Materiale preparato per il corso Technologie du Bâti VI, EPFL, 2021)  
 Geographic origin of the materials employed in the construction of the primary school in Orsonnens, Switzerland (TEd'A, 2014), and in that of Matosinhos, Portugal (aNC, 2013), organized by main construction systems and weight. Diagram organization follows the indications of figure 2. (Documentation prepared for the subject Technologie du Bâti VI, EPFL, 2021)

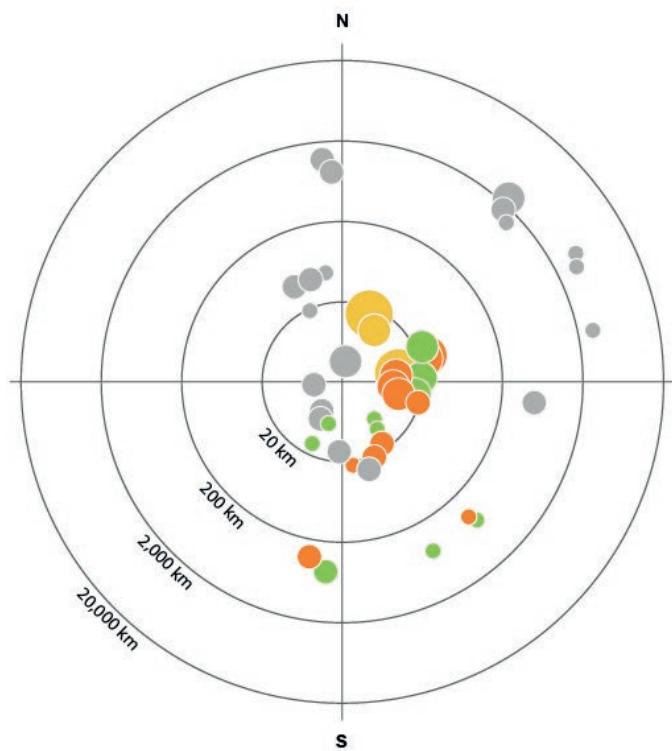
03 |



École primaire à Matosinhos, Portugal

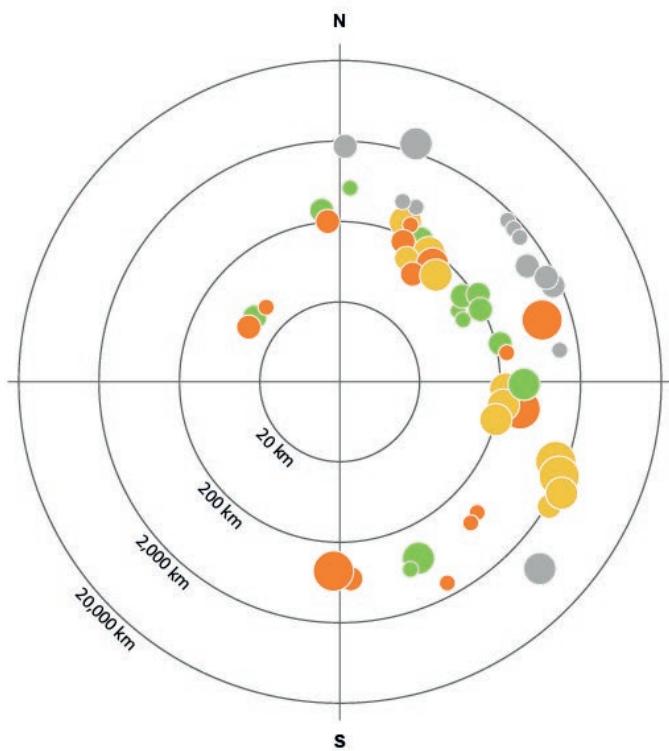


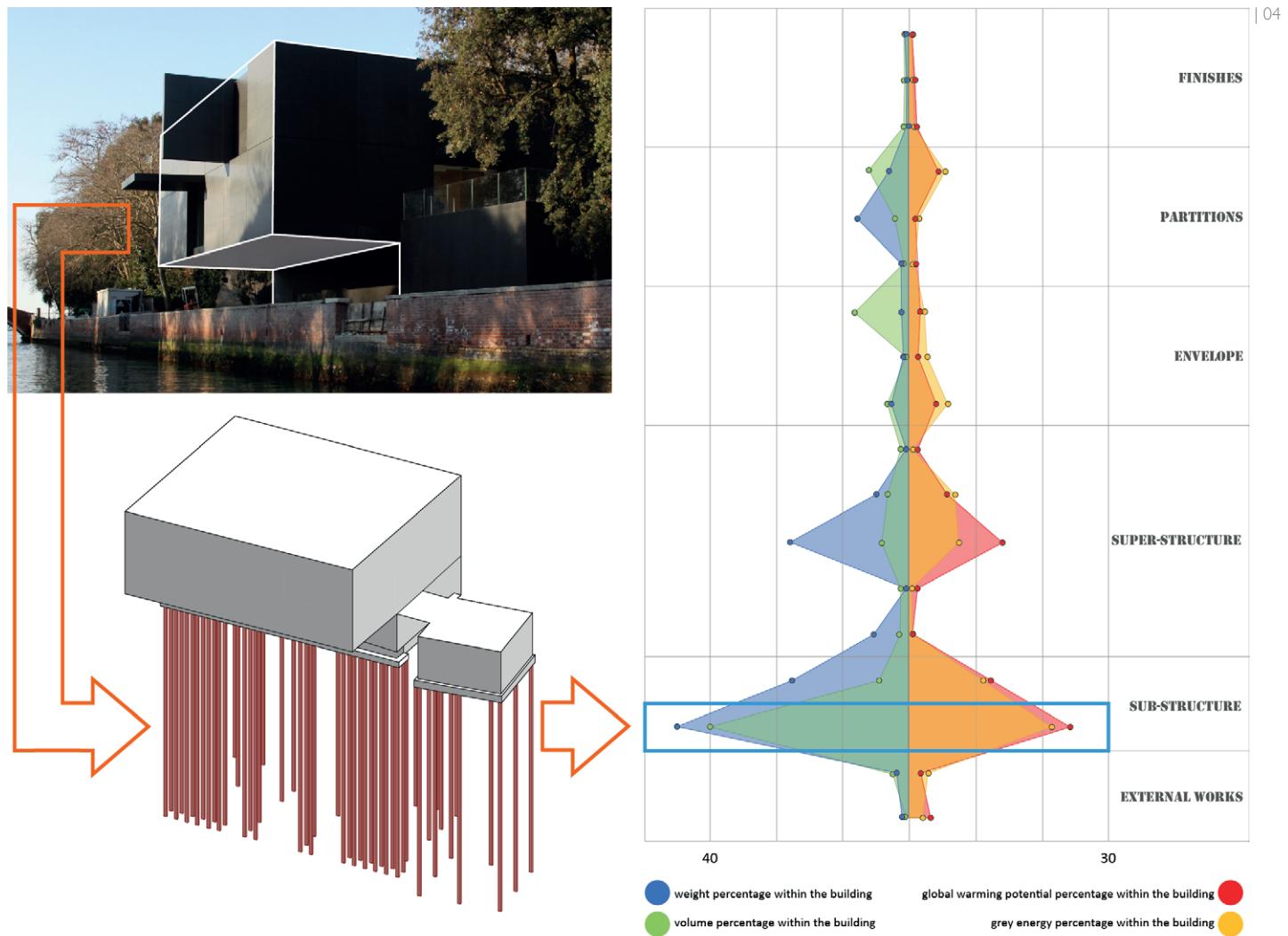
École primaire à Orsonnens, Suisse



structure      enveloppe      cloisons      installations

0/ 100	101/ 1,000	1,001/ 10,000	10,001/ 100,000	100,001/ 1,000,000 kg
●	●	●	●	●





tion tables, would enable us to question the logics of 'technical-territorial' choices. Why a material from that location? Why that method of assembly? Why that finish? Why that system? This way, geography would become not only the basis for a reflection on the consequences of design but also the physical documentation of an industrial organisation and the markets defined through it. For example, a study conducted by my laboratory FAR has concluded that the difference between the production atlas of a small elementary school in Switzerland and one in Portugal, both with very local supply chains, consists in the stronger geographic and socio-economic contiguity of the former with advanced mechanical service suppliers (and their cost indexes) as well as the use of prefabricated systems for the structure and the façade. Within an even smaller kilometre radius, the Por-

tuguese school makes much larger use of semiprocessed materials finished on site (Fig. 3). Same as with the previous section, there is an *ex-post* and an *ex-ante* way of absorbing this information. We can simply accept it, to understand the project and its production variables better, or we can use it to read the territory and reflect on its future restructuring needs on the basis of estimated or hypothesised building demand.

#### Technology as evaluation of alternatives

It is worth mentioning that support for a broader perspective on technology does not mean renouncing the tectonic scrutiny of the building fabric, which is a typical focus of the scholars of building techniques. Quite the opposite, in fact, as the same type of reasoning and information referred to earlier can be exploited to link

construction technique, architectural design, and environmental impact analysis, getting even into a discussion about language choices. Let us take a small yet striking (and thus clarifying) example: the recent Australian pavilion at the Venice Biennale (2015), characterised by a deep structural cantilever of the exhibition hall along the 'rio' that cuts across the park. Here we can technically dwell on the mixed concrete-steel structure that defines the box of the building, or the stratigraphy of the double external envelope. But we could also enter the technological dimension discussed thus far by contemplating, for instance, the amounts of resources used for the various parts of the building, with their eventual return in emissions. Here, the lion's share is created by the concrete foundation micropiles, with a below-ground height of 18 metres to support

an above-ground exhibition volume of 7 metres, required by the outward projection of the façade, given the conditions of the soft marsh-like soil (Fig. 4). This datum, impeccable when considered structurally, becomes an element for reflection if considered against the project as a whole – as part of the environment and intervention upon it. What is the value of the architectural cantilever vis-à-vis its contribution to climate change? What could its structural, compositional, energy-related alternatives have been, even inside the vocabulary of the architects in charge? These questions, two amongst many, are obviously pleonastic given the minuscule dimension of the question in the specific case. Yet they can become fundamental if made integral to the operative ethics of every project on that very territory, which, however, needs a theoretical base to affirm itself.

05| Gabriele Fontana, Projet de Diplôme *Le projet d'architecture derrière son processus de construction, une reconstitution du Rolex Learning Center de l'EPFL, EPFL, 2018. Comparaison entre le projet original de SANAA réalisé sur la base des décisions en cours d'œuvre (SANAA) et une restitution idéale de même dans le cas où les problèmes économiques-environnementaux sortis durant la construction de l'édifice auraient été prévus et insérés dans l'itération prédictive (EPFL student thesis).*

Gabriele Fontana, Projet de Diplôme *Le projet d'architecture derrière son processus de construction, une reconstitution du Rolex Learning Center de l'EPFL, EPFL, 2018. Comparison between the original design by SANAA as realized on the basis of the decisions made during construction (SANAA) and an ideal restitution of the same in the event the economic-environmental problems emerged during the process had been foreseen and inserted in the design proposal (EPFL student thesis).*

## Tecnologia come base di progetto 'ambientale'

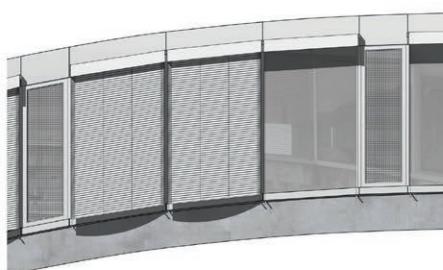
Anche al netto della didascalicità utilizzata per introdurre i tipi di analisi suggerite, quello che emerge dalla loro eventuale applicazione è la possibilità effettiva di pensare e trattare la tecnologia come dominio di riflessione tecnica e critica sugli spazi disponibili o necessari al progetto. Le modalità di lettura di quest'ultimo in quanto paesaggio aperto alla tecnica (piuttosto che definito da questa) hanno il merito di emanciparne la discussione da 'quello che é' a vantaggio di 'quello che potrebbe essere', traendo beneficio da nuovi modi di concettualizzare il costruito, nuovi modi di pensare su come intervenirci, nuovi modi di comparare esperienze fino ad oggi scollegate in quanto ragionevolmente uniche, e nuovi modi di comprenderne gli aspetti intrinseci (Fig. 5).

Tecnologia, quindi, non come qualcosa di successivo alla fase ideativa del lavoro, semplicemente strumentale alla sua messa in opera; bensí come quadro socio-tecnico ed integrato di riferimento a monte, sulla base del quale individuare i cardini critici del progetto, nonché le strategie possibili e/o preferibili per il suo soddisfacimento. Se sviluppato in modo propositivo, l'esercizio di una tale disciplina si configura come attività autonoma, e quindi a modo suo progettuale, cui spetta il compito di delineare o addirittura 'disegnare' la composizione del paesaggio industriale adatto agli scopi prefissi. In questo senso, lo sviluppo di un'analisi tecnologica nei termini suggeriti sarebbe di fatto da considerare come un atto di pianificazione strategica mirato al raggiungimento di una configurazione del sistema produttivo in edilizia che risponda ad esplicite esigenze

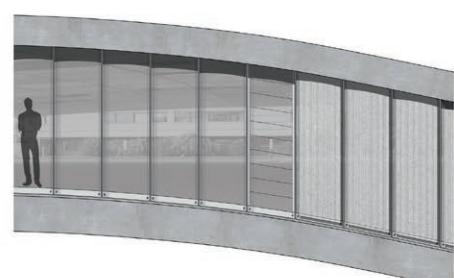
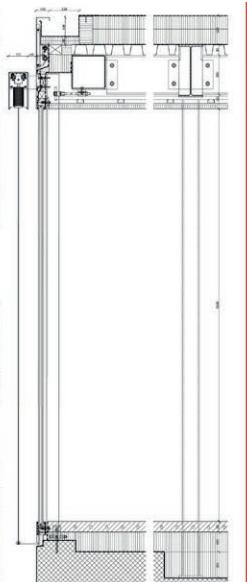
programmatiche (coprendo lo spazio dalla manifattura al riuso, passando per lo sviluppo fondiario).

Un tale punto di vista permette di collegarsi con una certa serendipità ad una genealogia specifica del concetto di tecnologia sin qui accennato, e cioè quella afferente agli scritti profetici di Lewis Mumford, il quale, negli anni '30 del ventesimo secolo, sosteneva la necessità di privilegiare un politecnicismo 'creativo', dove tecniche diverse venivano selezionate e combinate per fornire una soluzione ai problemi, complessi, della condizione umana (Mumford, 1934). Un tale politecnicismo era, secondo Mumford, da preferire al monotecnicismo scientifico, tecnocratico, abiologico, dell'America industriale, dove la tecnologia veniva sviluppata a proprio uso e consumo (Mumford, 1970). Se l'evoluzione personale del Mumford 'studioso' svela indirettamente gli sviluppi possibili di questa posizione, particolarmente nel passaggio dalla critica dei paradigmi tecnologici all'articolazione di una teoria dello sviluppo urbano e regionale che di tali paradigmi ne palesa le conseguenze, la storia odierna conferma non solo l'attualità del suo percorso intellettuale ma anche la pregnanza della profezia in esso contenuta, ovvero il riconoscere che il modo di gestire la tecnica costituisce la base ineludibile per strutturare cultura e politiche del territorio. Si potrebbe dire che la sfida abilitante é proprio quella – ed inevitabilmente interna alla tecnologia: porre gli strumenti oggi disponibili al servizio di un'afflato critico che ne interpreti e condizioni l'uso.

05 |



SANA



EPFL student thesis



## REFERENCES

- Mumford, L. (1934), *Technics and Civilization*, Brace & Company, Inc., Harcourt, New York.
- Mumford, L. (1970), *Pentagon Of Power: The Myth Of The Machine*, Vol. II, Harcourt Brace Jovanovich, New York.
- Robbins, L. (1932), *An Essay on the Nature and Significance of Economic Science*, Macmillan, London.
- Tombesi, P. (2008), "Out of what? Locating the underpinnings of theory", *Building Research & Information*, Vol. 36, n. 6, pp. 668-673.
- Tombesi, P. (2012), "What do we mean by building design?", in Marble, S. (Ed.), *Digital Workflows in Architecture: Design – Assembly – Industry*, Birkhauser, Berlin, pp. 184-199.
- Weber, M. (1949) "Objectivity" in social science and social policy", in *The Methodology of the Social Sciences*, The Free Press of Glencoe, Illinois, pp. 49-112.

### Technology as basis for the 'environmental' project

Even net of the degree of simplicity adopted in introducing the types of analyses suggested, what emerges from their eventual application is, indeed, the possibility of thinking about and treating technology as a domain of technical and critical reflection over the spaces available to or needed by the building project. The reading of the latter as a landscape open to techniques (rather than defined by them) has the merit of emancipating its discussion from 'what it is' to 'what it could be', hence benefitting from updated ways of conceptualising what gets built, new ways of thinking on how to intervene on it, new ways of comparing experiences until now considered separate as ostensibly unique, and new ways of understanding its most intrinsic aspects (Fig. 5). Technology, thus, not

as something following the conceptual phase of the work and simply functional to its materialisation; rather, as a socio-technical, integrated framework upstream, on the basis of which the critical junctures of the project can be identified, together with the possible and/or preferable strategies to adopt for its accomplishment. If developed propositionally, the exercise of such a discipline can configure itself as an autonomous activity, hence design-based in its own way, which responds to the task of delineating, when not 'designing', the composition of the industrial landscape suited to the objectives set in place. In this sense, developing a technological analysis according to the terms suggested could be considered as an act of strategic planning aimed at achieving a configuration of the production system in building that suited explicit programmatic needs

(bridging the gap from manufacture to reuse, even passing through land improvement). Such a viewpoint allows a somehow serendipitous connection to a specific genealogy of the concept of technology put forth in this text, i.e. deriving from the prophetic writings of Lewis Mumford, who, in the 1930s, championed the need to privilege a 'creative' polytechnicism, where diverse techniques would be selected and combined to provide a solution to the complex problems of the human condition (Mumford, 1934). Such understanding of polytechnicity was, according to Mumford, preferable to the scientific, technocratic, abiological monotechnicism of industrial America, where technology was being developed for its own sake and advantage (Mumford, 1970). The personal evolution of the Mumford 'scholar' indirectly reveals the possible develop-

ments of this position, particularly in the transition from his critique of technological paradigms to the articulation of a theory of urban and regional development, which discloses the consequences of such paradigms. But it is today's history that confirms not only the currency of his intellectual journey but also the poignancy of the prophecy it contained, i.e. the recognition that the way in which we manage techniques constitutes the unavoidable foundation on which territorial culture and policies get structured. One could say that the enabling challenge is exactly this, and inevitably internal to technology: to place the instruments available today at the service of a critical afflatus that could interpret and condition their use.

# HABITAT INTELLIGENTI E AUTO-SUFFICIENTI: IL RUOLO DELLA TECNOLOGIA PER IL FUTURO DELL'ARCHITETTURA

a cura di/edited by Francesca Thiébat, <https://orcid.org/0000-0003-4478-6693>

Oggi l'architettura attraverso la tecnologia sta muovendosi verso una dimensione organica, autosufficiente e generativa che richiama la dimensione ecologica intrinseca al concetto di habitat. La cultura tecnologica digitale permette infatti di riconsiderare il rapporto tra esigenze dei viventi, tecnologie e contesti abitabili riportando in primo piano la centralità dell'ambiente fisico e della riconfigurazione del rapporto dell'uomo con lo spazio in cui vive attraverso algoritmi computazionali (Perriccioli, 2021).

La rubrica Reportage del numero 25 di TECHNE si interroga sul ruolo di medium delle tecnologie nel definire contenuto, senso e significato del progetto, in una visione innovativa e multidisciplinare.

Il saggio visivo propone una riflessione sul rapporto tra tecnologia, utenti e ambiente attraverso una selezione di immagini tratte da Tomorrow Living (Huawei Milan Aesthetic Research Center con Frame Magazine) e :REWORLD | Repairing the Present, rassegne presentate al centro internazionale di Cultura Digitale MEET<sup>1</sup> diretto da Maria Grazia Mattei (Fig. 1). La smart "human city" progettata da Ben van Berkel (Fig. 2), i quartieri galleggianti dello studio Space&Matter (Fig. 3) e le Earth Station immaginate da Michele De Lucchi (Figg. 4, 5) sono esempi di come la tecnologia può rendere praticabile una dimensione interattiva, interoperabile, aperta ed evolutiva del progetto di architettura per prendere decisioni nell'ambito della sostenibilità. Grazie ad un 'ecosistema' di tecnologie (tra cui digital twin, big data, ICT) le città diventano «arcipelagi di quartieri auto-sufficienti e connessi tra loro, il cui cuore pulsante è rappresentato dalla comunità e dal conseguente scambio culturale»<sup>2</sup>.

La tecnologia può infatti avere un ruolo determinante nella concezione e realizzazione di habitat intelligenti, per il benessere, la qualità ecosistemica e l'adattività dell'ambiente costruito. Samira Benini Allaouat re-immagina l'illuminazione pubblica nelle aree verdi urbane nell'ambito di un progetto pilota a Barcellona attraverso una relazione simbiotica tra il mondo artificiale e quello naturale. I geobatteri presenti nel terreno, rappresentati nelle fotografie scientifiche del progetto Geo-Llum, diventano collaboratori essenziali per ripensare l'ecosistema urbano

mediante la loro capacità di generare elettricità e di risanare il suolo contaminato (Fig. 6)<sup>3</sup>.

La Tecnologia diventa anche un mezzo per contrastare la scarsità delle risorse attraverso processi regenerativi capaci di riequilibrare il rapporto tra globale e locale. Ouroboros di Kat Austen e Fara Peluso evidenzia la sinergia tra nuovi materiali e nuove estetiche per un futuro sostenibile. L'installazione<sup>4</sup> (Fig. 7) incorpora materiale bioplastico coltivato dalle alghe, che soddisfa non solo l'obiettivo circolare di non lasciare tracce, ma anche quello di favorire una nuova relazione tra esseri umani e natura<sup>5</sup>.

Claudia Pasquero e Marco Poletto, fondatori di EcoLogic Studio, stanno sperimentando come far integrare l'intelligenza biologica delle microalghe con i sistemi tecnologici architettonici e urbani (Fig. 9). Il progetto Deep Green<sup>6</sup> usa l'intelligenza artificiale per aumentare la presenza naturale nelle città attraverso infrastrutture biologiche in grado di metabolizzare gli agenti inquinanti. Dopo un'analisi di dati open source sul paesaggio e le infrastrutture attraverso algoritmi, vengono definiti scenari e strategie di gestione dei rifiuti, delle risorse idriche, dell'energia rinnovabile e dei sistemi naturali di filtrazione dell'inquinamento (Fig. 10).

Il progetto Berlin 2037 (Fig. 8) di Felix Gaedtke è un esempio di come la Tecnologia può costituire un'interfaccia tra utenti e fattori ambientali per la configurazione fisica e un uso compatibile dello spazio abitabile, da quello indoor sino al territorio. «L'opera si basa su un'esperienza narrativa di fantasia che combina scansioni fotogrammetriche su larga scala della Berlino contemporanea con animazioni in computer grafica immaginarie e futuristiche per sperimentare l'aspetto, il suono, l'odore e la sensazione di una città costruita con energia e costruzioni sostenibili.

Maya, una quattordicenne appassionata di computer e animazione 3D vive a Berlino e si è recentemente rotta il polso quando un camion l'ha fatta cadere dalla bicicletta in mezzo al traffico. Determinata a usare le sue competenze digitali per trasformare la sua città, Maya si prefigge la missione di creare una versione virtuale della sua Berlino, una versione a misura di bambino, sicura e sostenibile»<sup>4</sup>. Osservando questa esperienza virtuale e reale allo stesso tempo,

## INTELLIGENT, SELF-SUFFICIENT HABITATS: THE ROLE OF TECHNOLOGY FOR THE FUTURE OF ARCHITECTURE

Architecture's current use of technology is driving it towards an organic, self-sufficient and generative dimension reminiscent of the ecological dimension intrinsic in the concept of habitat. In fact, digital technological culture allows us to reconsider the relationship between the needs of living beings, technologies, and inhabitable environments, once again spotlighting the centrality of the physical context and the reconfiguration of the relationship between man and the space in which he lives thanks to computational algorithms (Perriccioli, 2021).

The Reportage column in issue n. 25 of TECHNE questions the role of the medium of technologies when establishing the content, sense, and meaning of design, based on an innovative and multidisciplinary vision. The visual essay proposes to reflect on the relationship between technology, users, and the environment by presenting a selection of images taken from Tomorrow Living (Huawei Milan Aesthetic Research Center with Frame Magazine) and :REWORLD | Repairing the Present, reviews presented at MEET, the International Centre for Digital Culture<sup>1</sup> directed by Maria Grazia Mattei (Fig. 1).

The smart "human city" designed by Ben van Berkel (Fig. 2), the floating neighbourhoods by the Space&Matter studio (Fig. 3) and the Earth Station imagined by Michele De Lucchi (Figs. 4, 5) are examples of how technology can make an interactive, interoperable, open, and evolutionary dimension of the architecture project feasible, thus allowing decisions to be made regarding sustainability. Thanks to an 'ecosystem' of technologies (including digital twin, big data, ICT) cities become «archipelagos of self-sufficient interconnected neighbourhoods, whose pulsing heart is represented by the community and subsequent cultural exchange»<sup>2</sup>.

In fact, technology can play a crucial role in the conception and construction of intelligent habitats for the well-being, ecosystemic quality, and adaptability of the built environment. By creating a symbiotic relationship between the artificial and the natural world, Samira Benini Allaouat re-imagined public lighting in urban green areas as part of a pilot project implemented in

## REPORTAGE

Barcelona. The geobacter in the soil, illustrated in the scientific photographs presented in the Geo-Llum projects, become key collaborators to rethink the urban ecosystem thanks to their ability to generate electricity and clean up contaminated soil (Fig. 6)<sup>3</sup>.

Technology becomes a way to contrast scarce resources using regenerative processes that can rebalance the relationship between global and local. Ouroboros by Kat Austin and Fara Peluso highlights the synergy between new materials and new aesthetics for a sustainable future. The installation<sup>4</sup> (Fig. 7) contains bioplastic material cultivated using algae, which fulfills not only the circular objective of leaving no traces behind, but also fosters a new relationship between human beings and nature<sup>5</sup>.

The experiments by Claudia Pasquero and Marco Poletto, founders of EcoLogic Studio, focus on how to make the biological intelligence of microalgae interact with technological, architectural and urban systems (Fig. 9). The Deep Green project<sup>6</sup> uses artificial intelligence to increase the presence of nature in cities by exploiting biological infrastructures capable of metabolizing the polluting agents. After using algorithms to analyse open source data regarding the landscape and infrastructures, it develops scenarios and strategies to manage waste, water resources, renewable energy, and natural systems to filter pollution (Fig. 10). The Berlin 2037 project (Fig. 8) by Felix Gaedtke is an example of how Technology can become an interface between users and environmental factors to achieve the physical configuration and compatible use of inhabitable space, ranging from indoor space to the territory. «The work is based on an imaginary narrative experience merging large-scale photogrammetric scans of contemporary Berlin with imaginary and futuristic graphics in order to experiment with the appearance, sound, smell, and sensation of a city built using sustainable energy and constructions. Maya, a fourteen-year old girl living in Berlin who loves computers and 3D animations, recently broke her wrist when a lorry hit her while she was cycling in traffic. Determined to use her digital skills to transform her city, Maya's goal is to create a virtual version of Berlin – her version of a safe, sustainable city tailor-made for children»<sup>4</sup>. While examining this virtual and yet also real experience, the article questions the ability of physical (real) space

il saggio si interroga infine sulla capacità dello spazio fisico (reale) di influire sulla percezione dell'oggetto digitale (virtuale) e viceversa. «La relazione tra spazio fisico e spazio virtuale si sta facendo sempre più stringente» sostiene M. G. Mattei «perché abbiamo esperienze che si incrociano tra realtà fisica e realtà virtuale. Nella sala immersiva del MEET quando si proiettano le opere la sala si trasforma. La relazione tra fisico e virtuale è un andare e venire dal virtuale e reale e viceversa. Ad esempio l'opera degli Space Popular, The Global Home (Figg. 11,12), ti fa capire che c'è una continuità tra l'esperienza reale e quella virtuale. Gli artisti hanno 'costruito' stanze virtuali dove hanno collocato oggetti d'uso comune della vita reale. Il visitatore entra ed esce da queste due realtà diverse come se fossero un unico spazio, un'unica realtà, un metaverso».

Qual è quindi il ruolo dell'architetto del futuro? «Il virtuale non è fatto di muri, non è fatto di stanze (reali)» prosegue Mattei «nel virtuale si deve progettare in maniera diversa. Discipline e specializzazioni non servono più per governare la complessità tra fisico e virtuale, si dovrebbe quindi parlare di a-disciplinarietà. Si deve pensare alla formazione di una figura diversa di architetto o di designer. Occorre forse ritornare al pensiero umanistico totale che Leonardo da Vinci ha saputo combinare con un approccio creativo».

#### NOTE

<sup>1</sup> Il progetto Tomorrow Living, esposto al MEET dal 5 al 30 giugno 2022, è un documentario promosso da Huawei Milan Aesthetic Research Center e curato dal direttore di Frame Magazine Robert Thiemann. Video disponibili al link [www.youtube.com/@tomorrowlivingdocumentary6112/videos](https://www.youtube.com/@tomorrowlivingdocumentary6112/videos) (ultimo accesso 2.12.2022). L'esposizione :REWORLD | Repairing the Present curata da Manuel Cirauqui presso il MEET (4-30/10/2022), fa parte di un progetto interdisciplinare lanciato nel giugno 2021 da dodici centri regionali S+T+ARTS, un'iniziativa della Commissione Europea che esplora il potenziale della collaborazione tra Scienza, Tecnologia e Arte.

<sup>2</sup> <https://www.meetcenter.it/it/event/tomorrow-living-salone-del-mobile-2022/>

<sup>3</sup> Geo-Llum è stato sviluppato nell'ambito di Microorganism Cities,

una residenza ospitata dal CCCB e lanciata insieme a Sonar e al Politecnico di Barcellona. Il progetto fa parte del primo programma pilota di biorisanamento della città di Barcellona ed è stato sviluppato in collaborazione con il Green City Lab Barcelona e Akasha Hub, a Horta del Clot.

<sup>4</sup> <https://www.meetcenter.it/it/reworld-gli-artisti-in-mostra-a-meet/>

<sup>5</sup> Ouroboros è stato sviluppato nell'ambito della residenza Circular Futures, ospitata da Ars Electronica. La residenza mirava ad affrontare la crisi delle risorse energetiche attraverso soluzioni innovative e artistiche che ripensino le modalità di coinvolgimento delle risorse attraverso il design circolare, l'ingegneria, la produzione, la distribuzione, la riparazione e il riciclaggio.

<sup>6</sup> Progetto finanziato da United Nations Development Programme che analizza di tre città, Guatemala City, Mogadiscio (Somalia) e Vranje (Srbia).

#### REFERENCES

Perriccioli, M. (2021), "The alliance between ecology and cybernetics for a new design science", TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment, Vol. 21, pp. 88-93.

to influence the perception of the digital (virtual) object, and vice versa. M. G. Mattei maintains that «the relationship between physical space and virtual space is becoming increasingly pressing issue, because we have experiences that intersect physical reality and virtual reality. When the projects are projected in the immersive room of the MEET, the room is transformed. The relationship between physical and virtual moves back and forth between what is real and what is virtual, and vice versa. For example, Space Popular's film, The Global Home (Figs. 11, 12), explains the continuity that exists between the real and virtual experience. The artists have 'built' virtual rooms where they have placed several ordinary, everyday objects we use in real life. Visitors enter and exit these two different realities as if they were just one space, just one reality, a metaverse».

So, what role will the architect play in the future? Mattei goes on to add: «The virtual is not made of walls, it is not made of (real) rooms... in the virtual world we must design in a different manner. Disciplines and specialisations are no longer needed to govern the complexity between physical and virtual, so now we should talk of non-disciplinarity. We must think about creating another figure, someone who differs from that of an architect or designer. We should perhaps return to the total humanistic philosophy that Leonardo da Vinci combined so successfully by adopting a creative approach».

#### NOTES

<sup>1</sup> The Tomorrow Living project, displayed at the MEET from June 5th to 30th, 2022, is a documentary sponsored by Huawei Milan Aesthetic Research Center and curated by the director of Frame Magazine, Robert Thiemann. Video available using the link [www.youtube.com/@tomorrowlivingdocumentary6112/videos](https://www.youtube.com/@tomorrowlivingdocumentary6112/videos) (last access 2.12.2022).

The :REWORLD | Repairing the Present exhibit curated by Manuel Cirauqui at the MEET (4-30/10/2022), is part of an interdisciplinary project launched in June 2021 by twelve regional centres S+T+ARTS; this initiative by the European Commission explores the potential of collaboration between Science, Technology and Art.

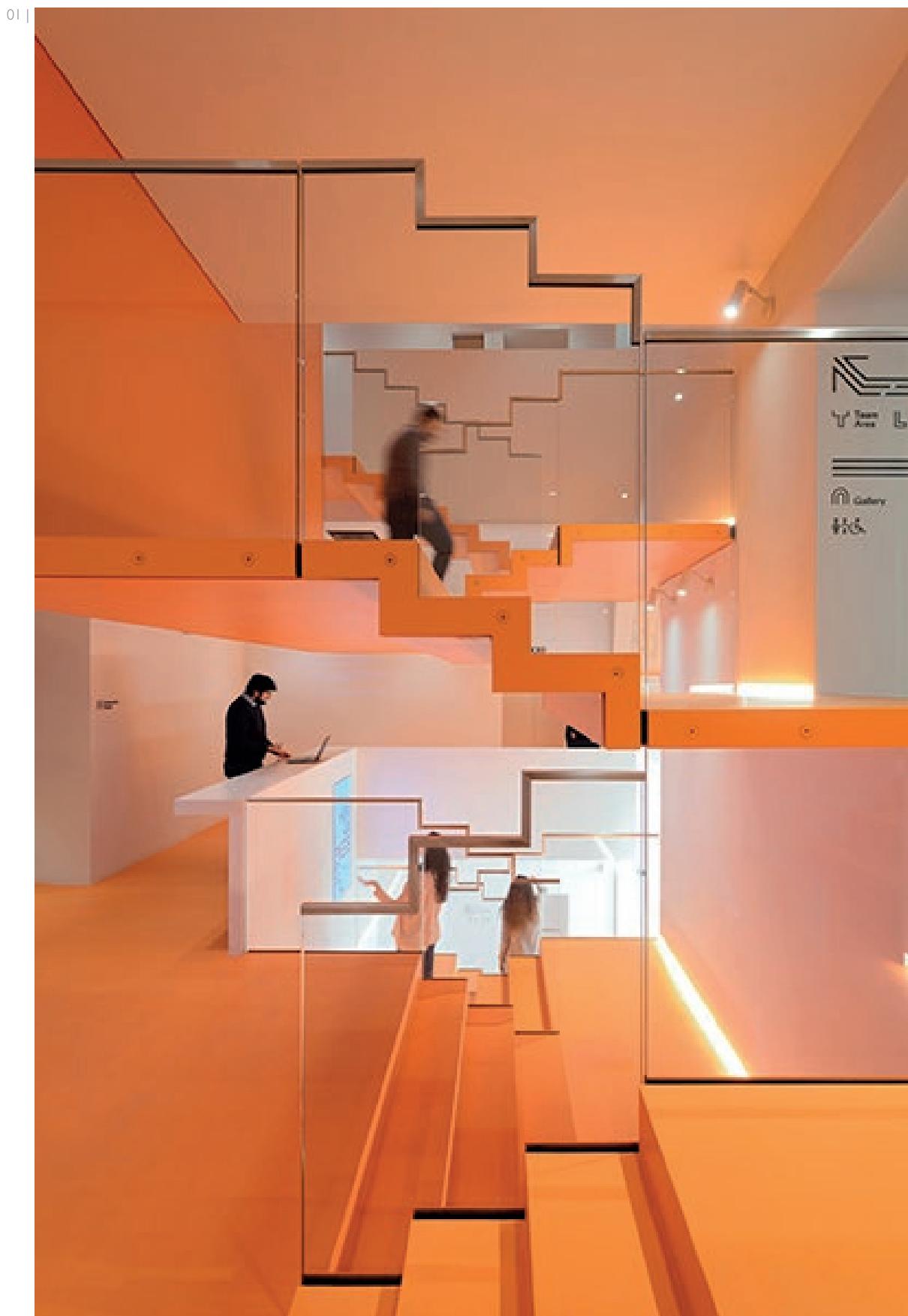
<sup>2</sup> <https://www.meetcenter.it/it/event/tomorrow-living-salone-del-mobile-2022/>

<sup>3</sup> Geo-Llum was developed as part of Microorganism Cities, a residency hosted by the CCCB and launched together with Sonar at the Polytechnic of Barcelona. The project is part of the first pilot project of bioremediation sponsored by the city of Barcelona and was developed in collaboration with the Green City Lab Barcelona and Akasha Hub, in Horta del Clot.

<sup>4</sup> <https://www.meetcenter.it/it/reworld-gli-artisti-in-mostra-a-meet/>

<sup>5</sup> Ouroboros was developed as part of the Circular Futures residency, hosted by Ars Electronica. The residency's goal was to tackle the crisis of energy resources by adopting innovative, artistic solutions that redesign the way in which resources are used thanks to circular design, engineering, production, distribution, repair and recycling.

<sup>6</sup> Project financed by the United Nations Development Programme analysing three cities: Guatemala City, Mogadishu (Somalia) and Vranje (Serbia).



02 | Ben von Berkel. Smart city. Fotogramma tratto da Tomorrow Living di Huawei Milan Aesthetic Research Center presentato al MEET

*Ben von Berkel. Smart city. Still from Tomorrow Living of Huawei Milan Aesthetic Research Center presented at MEET*

03 | Space & Matter. Quartiere Schoonschip Fotogramma tratto da Tomorrow Living di Huawei Milan Aesthetic Research Center presentato al MEET

*Space & Matter. Schoonschip project. Still from Tomorrow Living of Huawei Milan Aesthetic Research Center presented at MEET*

04-05 | MDL CIRCLE Earth stations. Fotogramma tratto da Tomorrow Living di Huawei Milan Aesthetic Research Center presentato al MEET

*AMDL CIRCLE. Earth stations. Still from Tomorrow Living of Huawei Milan Aesthetic Research Center presented at MEET*

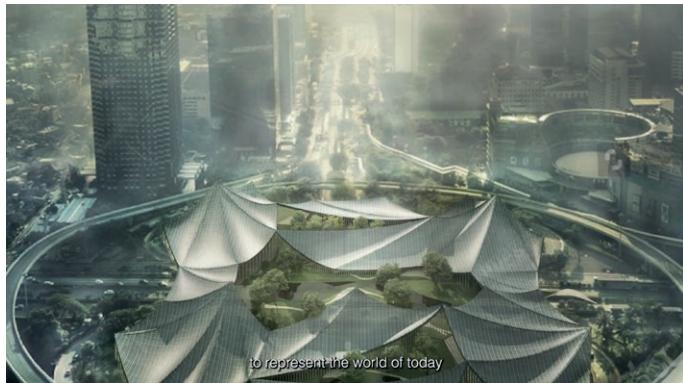
02 |



| 03



04 |



| 05

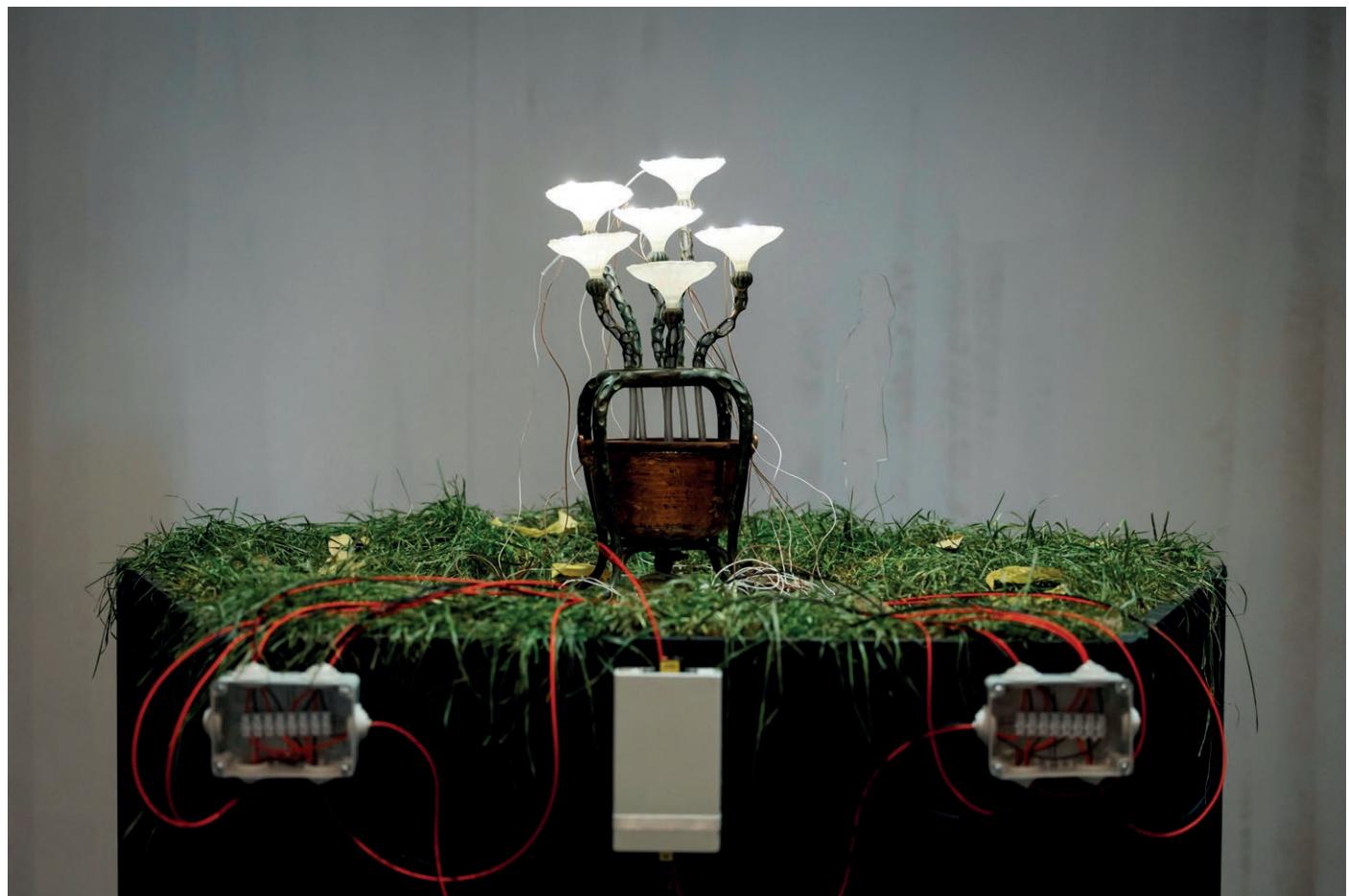


06 | Samira Benini Allaouat. Geo-Llum. :REWORLD | Repairing the Present, MEET. Fotocredit: Musacchio-lanniello-Pasqualini Geo-Llum

07 | Kat Austen e Fara Peluso. Ouroboros. :REWORLD | Repairing the Present, MEET. Fotocredit: Kat Austen, Fara Peluso CC BY-NC-ND 2.0 [www.flickr.com/photos/arselectronica/52258872880](http://www.flickr.com/photos/arselectronica/52258872880)

08 | Felix Gaedtke. Berlin 2037. :REWORLD | Repairing the Present, MEET. Fotocredit: Francesco Prandoni

06 |



07 |



| 08



09 | EcoLogic Studio. H.O.R.T.U.S. Fotogramma tratto da Tomorrow Living di Huawei Milan Aesthetic Research Center presentato al MEET

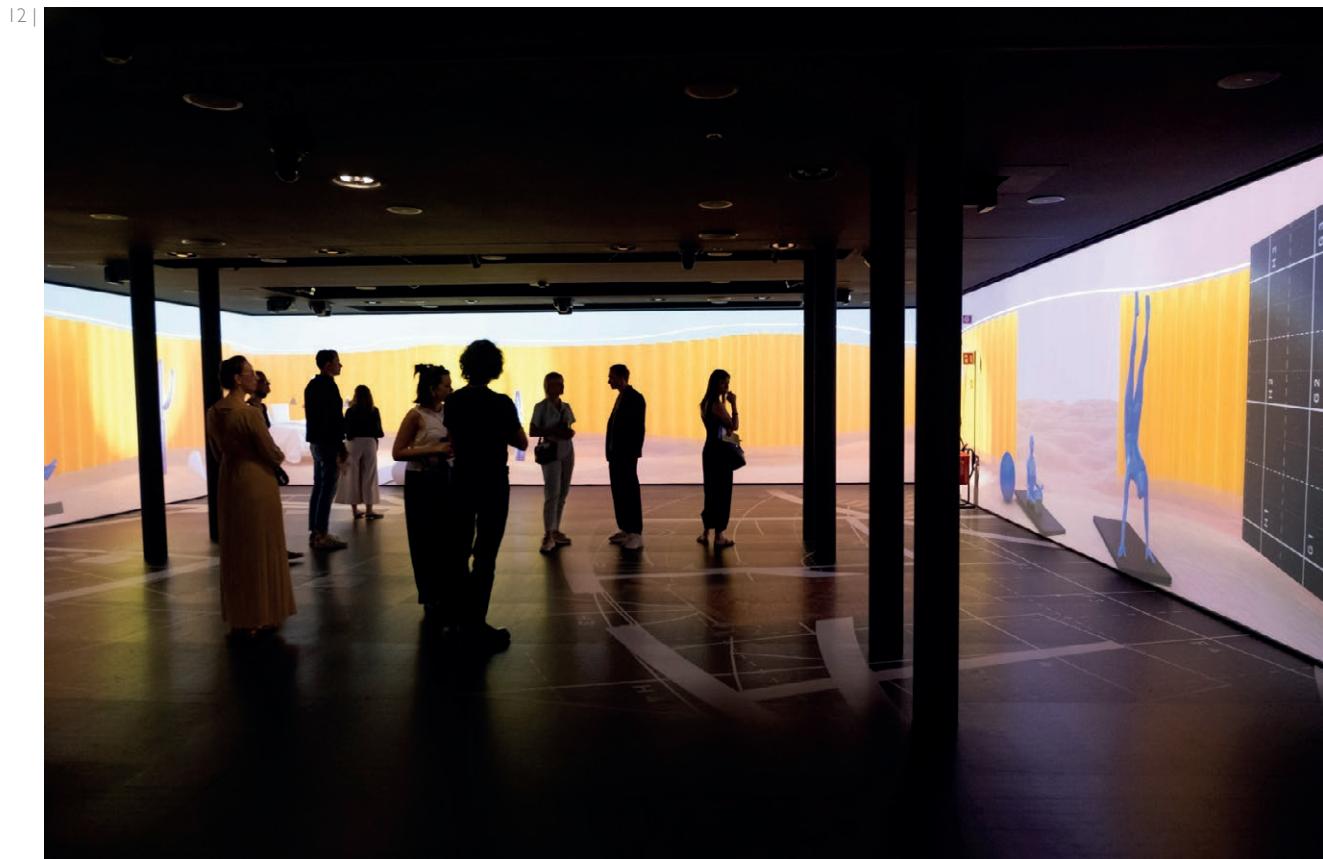
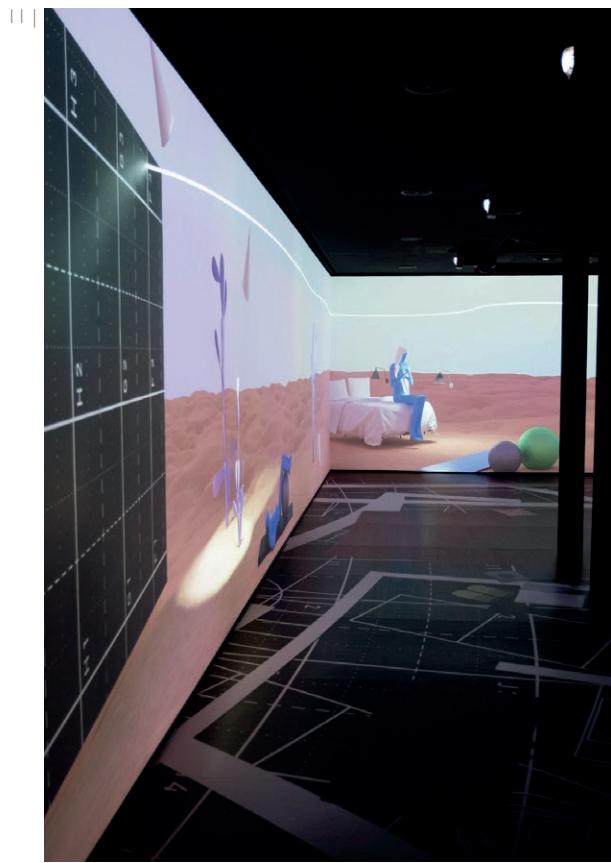
EcoLogic Studio H.O.R.T.U.S. Still from Tomorrow Living of Huawei Milan Aesthetic Research Center presented at MEET

10 | EcoLogic Studio. Deep Green. Fotogramma tratto da Tomorrow Living di Huawei Milan Aesthetic Research Center presentato al MEET

EcoLogic Studio. Deep Green. Still from Tomorrow Living of Huawei Milan Aesthetic Research Center presented at MEET



11-12 | Space polular: The Global Home. Tomorrow Living di Huawei Milan Aesthetic Research Center presentato al MEET. Fotocredit: Luca Marenda  
Space polular: The Global Home. Tomorrow Living of Huawei Milan Aesthetic Research Center presented at MEET. Fotocredit: Luca Marenda



Gian Luca Brunetti, <https://orcid.org/0000-0002-4476-6775>  
Dipartimento di Architettura e Studi Urbani, Politecnico di Milano, Italia

[gianluca.brunetti@polimi.it](mailto:gianluca.brunetti@polimi.it)

**Abstract.** L'articolo analizza le tendenze di evoluzione nell'utilizzo dell'intelligenza artificiale nella progettazione architettonica, evidenziando: a) la perdita di terreno dei sistemi esperti basati sulla conoscenza e la diffusione di sistemi combinati con approcci euristici e stocastici; b) la diffusione degli algoritmi evolutivi nell'ottimizzazione; c) il culmine dell'influenza degli approcci probabilistici attorno 2010; d) il dilagare dell'apprendimento profondo a partire dal 2012. E' probabile che il passo successivo richieda un'ibridazione di reti neuronali profonde e intelligenza artificiale simbolica. Ci si attende che fondamentale in questo passaggio sia il contributo in termini di formalizzazione della conoscenza da parte degli esperti della materia architettonico-progettuale.

**Parole chiave:** Intelligenza artificiale; Simulazione ambientale; Scienza delle decisioni; Approccio sistematico; Design thinking.

### La fase dei sistemi esperti

Gli ultimi quaranta anni hanno visto una rivoluzione nel campo dell'intelligenza artificiale a supporto della progettazione architettonica. Gli anni '60, '70 e '80 furono caratterizzati dalla prevalenza dei cosiddetti sistemi esperti, basati sull'applicazione di istruzioni di tipo *if-then-else* e sull'acquisizione di conoscenza da esperti della materia (Newell 1982), in una prospettiva di *problem-solving* strutturato in ambiti di opzioni progettuali (Newell and Simon 1972)<sup>1</sup>. Ma dopo un periodo di euforia ed ottimismo sulle potenzialità di tali sistemi, culminato negli anni '80, divenne chiaro che essi manifestavano importanti fragilità, derivanti da una loro difficoltà a prendere in conto le complesse, e spesso implicite, condizioni di contesto che entrano in gioco nella progettazione architettonica, e che i progettisti in genere affrontano utilizzando il buon senso – che è apunto quanto vi sia di più difficile da ottenere attraverso logiche induttive/deduttive. Non è un caso che i più interessanti risultati di quei sistemi in campo edilizio si siano riscontrati in applica-

zioni dominate da esigenze di *pattern matching*, come, per esempio, le diagnosi di patologie edilizie o le verifiche di conformità (Rosenman *et al.*, 1986; Schwarz *et al.*, 1994).

Ciò che rende difficile approcciare i problemi di progettazione architettonica con sistemi esperti è da un lato il fatto che essi riscontrino difficoltà a gestire i propri processi di apprendimento in modo autonomo, non supervisionato da esseri umani, e dall'altro che, nella progettazione architettonica, oggetto delle decisioni non sono solo le soluzioni da adottarsi, ma anche gli stessi obiettivi (Dorst and Cross, 2001). Questo non ha però impedito che bilancio dell'utilizzo dei sistemi esperti nella progettazione possa considerarsi, complessivamente, positivo, perché molte tecniche in essi utilizzate (come la programmazione a oggetti, la propagazione dei vincoli, l'integrazione di database relazionali) sono confluiti in modo capillare nei sistemi CAD oggi in uso.

### Dal consolidamento dei metodi stocastici all'avvento degli approcci probabilistici

La presa d'atto dei limiti dei sistemi esperti nel periodo a cavallo tra i due millenni è coincisa con la crescita, da una parte, degli approcci metaeuristici basati su processi stocastici (i più utilizzati dei quali sono gli algoritmi evolutivi – Goldberg, 2002 –, le macchine a vettori di supporto – Cortes e Vapnik, 1995 – e i metodi del tipo *nearest neighbour* – Brunetti, 2020), e dall'altra, delle strategie probabilistiche, bayesiane, poiché in grado di rendere conto dei gradi di indeterminazione e ambiguità propri della realtà (Pearl, 1988). I metodi metaeuristici sono oggi utilizzati soprattutto per l'ottimizzazione, e sarebbero potenzialmente in grado di coprire

### Evolutionary trends in the use of artificial intelligence in support of architectural design

**Abstract.** The paper analyses the evolutionary tendencies in the use of artificial intelligence in building design, highlighting: a) the ground lost by knowledge-based expert systems and the diffusion of systems combined with heuristic and stochastic approaches; b) the spread of evolutionary algorithms in the field of optimisation; c) a climax of the influence of probabilistic approaches around 2010; d) the progressive dominance of deep learning since 2012. It is likely that the next step requires hybridisation of deep learning and symbolic artificial intelligence, and it is expected that the contribution of design domain experts in terms of knowledge formalisation will be a fundamental driver of it.

**Keywords:** Artificial intelligence; Environmental simulation; Decision science; Systemic approach; Design thinking.

### The phase of expert systems

In the last forty years, a revolution has taken place in the field of artificial intelligence for architectural design. From the 1960s to the 1980s, the prevalent line of attack to the problem of assisting design by means of artificial intelligence techniques was characterised by the prevalence of so-called expert systems, based on the application of instructions of the kind *if-then-else*, and on knowledge acquisition through the input of experts (Newell, 1982), in a perspective of problem-solving structured in design option spaces (Newell and Simon 1972)<sup>1</sup>. But after a period of euphoria about their possibilities in the 1980s, it became clear that those systems had critical weaknesses, mainly deriving from their difficulty in taking into account the complex, numerous and often implicit contextual conditions of problems

that are at play in architectural design, and that are resolved by human beings mainly on the basis of common sense – the most challenging aspect to pursue through the application of inductive/deductive logic. It is no coincidence that the most interesting results of expert systems in the construction sector back then were to be found in applications characterised by substantial pattern-matching requirements – like building diagnoses, or conformity verifications – rather than generative tasks (Rosenman *et al.*, 1986; Schwarz *et al.*, 1994).

What makes architectural design problems difficult to approach with knowledge-based expert systems is, on the one hand, the fact that in them, the objects of decisions are not only the ways to solve problems, but also the design objectives themselves, which are often implicit and nuanced (Dorst

una parte consistente del processo progettuale; ma nonostante questo essi – specialmente a causa delle difficoltà tecniche connesse alla loro applicazione a problemi caratterizzati da ampi gradi di libertà quali quelli delle fasi iniziali del progetto di architettura (Brunetti, 2016) – sono ancora soprattutto utilizzati per poco più che un *fine-tuning* di soluzioni già definite. I più importanti tra i metodi di ottimizzazione nella progettazione architettonica si sono rivelati gli algoritmi genetici, che oggi sono infatti molto utilizzati sia in campo energetico (Gan *et al.*, 2019), sia strutturale (Boonstra *et al.*, 2020), e anche presenti nell’arena della generazione della forma (Boonstra *et al.*, 2021). Il periodo aureo degli approcci probabilistici è culminato attorno al 2010, generando, in breve tempo, numerosi sistemi di supporto alla progettazione nel campo dell’architettura (Sokol *et al.*, 2017); che non hanno però fatto tabula rasa degli approcci che li avevano preceduti, ma si sono ibridati con essi – in particolare, con i metodi basati sull’applicazione logica di regole, procedurali, e con i metodi metaeuristici stocastici, potenziandoli. Il risultato di queste ibridazioni è stata la generazione di sistemi di supporto alla progettazione compositi, robusti ed adeguati alle esigenze della modernità, utilizzabili in ambiti che spaziano dall’ottimizzazione (Wu and Wang, 2020) alla generazione progettuale (Liu and Wu, 2015), talvolta con il supporto di *shape grammars* (Wang and Zhang, 2020).

## Il Deep learning

La fase di evoluzione successiva a quella probabilistica ha messo a frutto avanzamenti di ricerca nel campo delle reti neuronali artificiali<sup>2</sup>, che hanno portato alla definizione del cosiddetto “apprendimento profondo” (*Deep Learning* - LeCun *et al.*,

2015)<sup>3</sup>. Oltre alla tecnica della retropropagazione (Rumelhart *et al.*, 1987), le pietre miliari lungo la strada del *Deep Learning* possono essere considerate (a) le reti neuronali ricorrenti (Hochreiter and Schmidhuber, 1997), che hanno costituito un avanzamento risolutivo nella modellazione delle sequenze, quali quelle di testi e musiche, e (b) le reti convoluzionali (LeCun *et al.*, 1989), strutturate in “cascate” di crescente capacità di generalizzazione, secondo uno schema mutuato dai sistemi neuronali visivi animali, e per questo caratterizzate da finissime potenzialità di riconoscimento di pattern dei quali l’architettura è ricca.

Il *deep learning* è stato reso possibile da aumenti del numero di strati di neuroni costituenti le reti, e del numero dei neuroni stessi e loro connessioni, che, in combinazione, hanno dischiuso funzionalità una volta impensabili, come quella dell’apprendimento non supervisionato. Altri importanti avanzamenti che hanno accompagnato la maturazione del *deep learning* sono costituiti da: (1) l’invenzione delle reti generative avversarie, caratterizzate dalla cooperazione tra una rete caricata del compito di riconoscimento delle soluzioni progettuali valide, e di un’altra rete “allenatrice” della capacità della prima di discriminare (Goodfellow *et al.*, 2014); (2) l’invenzione dei cosiddetti meccanismi di attenzione, incorporati nelle reti neuronali del tipo *trasformatore*, in grado di operare una focalizzazione selettiva delle risorse computazionali, e per questo avvantaggiate nella comprensione delle relazioni di contesto, fondamentali nell’ambito del progetto di architettura (Vaswani *et al.*, 2017); (3) l’invenzione di algoritmi basati sulla minimizzazione di un contenuto energetico metaforico (concepito in analogia con la teoria della Fisica quantistica - Ackley *et. al.*, 1985), liberi da

and Cross, 2001). But, these premises did not prevent the overall balance of expert systems from being fairly positive overall, as many of the techniques on which they are founded (such as object-oriented programming, constraint propagation, integration of relational databases) have been capillarily integrated into the CAD systems in use today.

## From stochastic methods to probabilistic approaches

The emergence of the limits of knowledge-based expert systems coincided, on the one hand, with the growth of metaheuristic approaches founded on stochastic processes (among the most used of which there are evolutionary algorithms – Goldberg 2002 –, support vector machines – Cortes and machines Vapnik, 1995 –, and the nearest neighbour methods – Brunetti, 2020), and

on the other hand, with probabilistic, Bayesian methods (Pearl, 1988), which are indeed strong in that rule-based systems are weak: precisely, the ability to deal with uncertainties and ambiguities that are typical of reality. Today metaheuristic methods are mainly used for optimisation, and would be potentially suited to cover a substantial part of the design process, but they are, above all, utilised for almost nothing more than fine-tuning already defined architectural solutions. This is due to the technical difficulty of applying them to problems characterised by great degrees of freedom, like the ones typical of preliminary architectural design (Brunetti, 2016). The most important among those methods have proven to be genetic algorithms, which today are often utilised both in the energy (Gan *et al.*, 2019) and the structural fields (Boonstra *et al.* 2020),

and are also present in the form-finding arena (Boonstra *et al.*, 2021). The golden age of probabilistic approaches culminated around 2010, generating numerous design support systems in the field of architecture (Sokol *et al.*, 2017), which have not, however, wiped out rule-based approaches nor metaheuristic methods, but have coexisted and hybridised with them. The result of such hybridisation is the generation of composite design support systems, robust and adapted to the needs of modernity. They are ubiquitous today, from the field of optimisation (Wu and Wang, 2020) to design generation (Liu and Wu, 2015), sometimes through the use of shape grammars (Wang and Zhang, 2020).

## Deep learning

The evolution following the probabilistic phase finalised significant previ-

ous innovations in the field of artificial neural networks<sup>2</sup>, leading to the so-called *Deep Learning* (LeCun *et al.*, 2015)<sup>3</sup>. Besides backpropagation (Rumelhart *et al.*, 1987), the milestones along the path of Deep Learning can be considered (a) recurrent neural networks (Hochreiter and Schmidhuber, 1997), which have constituted a ground-breaking advancement in the modelling of sequences such as those of texts and music; and (b) convolutional neural networks (LeCun *et al.*, 1989), which are structured in hierarchical configurations organised into “casques” of increasing levels of generalisation capacity, thanks to which they are characterised by very fine pattern recognition abilities.

Deep learning has been made possible by an increase in neuronal layers, as well as in the neurons and their connections, which, in combination, have

necessità di apprendimento “per rinforzo” e dalla necessità di adottare obiettivi predefiniti ed immutabili. Non da ultimo, le sperimentazioni sulle reti profonde sono state determinanti per il miglioramento del livello di comprensione delle strutture neuronali animali, confermando l’importanza della concertazione tra molteplici “motori di inferenza” che era già stata evidenziata dagli studi basati su un approccio simbolico all’intelligenza artificiale (Minsky, 1986).

Per quanto le reti neuronali siano oggi sempre più presenti nella ricerca interna al campo dell’architettura, non hanno comunque scalzato gli altri approcci metaeuristici, né gli approcci procedurali; esse, piuttosto, coesistono con questi. Ciò si riscontra tanto nel campo della verifica progettuale (versante procedurale: Xue and Zhang, 2022; versante neuronale: Zhang and El-Gohary, 2021), quanto in quello del controllo operazionale degli edifici (versante procedurale: Sterl and Mahdavi, 2022; versante neuronale: Moon *et al.*, 2011) e in quello dell’estrazione di informazioni da misurazioni e modelli (versante metaeuristico: Zhang *et al.*, 2022; versante neuronale: Liu, 2021).

Nel campo dell’architettura, uno degli ambiti di ricerca più attivi, e più rappresentativo delle tendenze in atto, è quello della progettazione di layout planimetrici di edifici. In tale ambito: (a) le reti generative avversarie hanno dimostrato vantaggi nell’apprendimento da quantità quantitativamente modeste di casi studio (Luo and Huang, 2022; Chailloux, 2020); (b) le reti convoluzionali hanno confermato di eccellere per capacità di riconoscimento e generalizzazione dei pattern (Gonzalez *et al.*, 2020); (c) le applicazioni neuronali combinate ad organizzazione delle relazioni attraverso grafi hanno evidenziato i vantaggi derivanti dalla scomposizione dei problemi progettuali

opened possibilities that were once unthinkable, like unsupervised learning. Other important advancements that have accompanied the maturation of deep learning include: (1) the invention of generative adversarial networks, characterised by the cooperation of two types of networks, one charged with the task of recognising valid solutions, and the other tasked with “coaching” the former’s discrimination ability (Goodfellow *et al.*, 2014); (2) the invention of the so-called attention mechanisms – incorporated into transformer-type neural networks – capable of exerting a selective focus of computational resources and thus benefitting from an improved ability of learning context relationships (Vaswani *et al.*, 2017); (3) the invention of the so-called energy-based algorithms, based on minimisation of a metaphoric energy content (conceived

in analogy with the theory of quantum physics – Ackley *et al.*, 1985), which are free from the need for “reinforcement learning” and from the necessity of relying on pre-defined and immutable objectives. Last but not least, the experiments based on deep networks improved the understanding of living neural nets, and confirmed the importance of the interplay between multiple “inference engines” in the brain, which had already been stressed by studies based on a symbolic approach to artificial intelligence (Minsky, 1986).

Although neural networks today are increasingly present in architectural research, they have not superseded either the other metaheuristic approaches, or the procedural approaches, but co-exist with them. This can be seen both in the field of design verification (procedural side: Xue and

in parti più piccole e maneggevoli, attraverso strategie di tipo *divide and conquer* (Hu *et al.*, 2020); (d) e le sperimentazioni generative basate su reti di tipo *trasformer/autoencoder* hanno evidenziato i vantaggi derivanti dal potenziamento della capacità di auto-supervisionamento nell’apprendimento (de Miguel Rodríguez *et al.*, 2020). Sul versante della ricerca operativa, si sono infine segnalate sperimentazioni finalizzate a favorire la cooperazione tra uomo e macchina, attraverso configurazioni del tipo “human-in-the-loop” (Hu *et al.*, 2020).

La situazione attuale è che il ricorso all’intelligenza artificiale nella progettazione architettonica è ancora un approccio di nicchia, che dimostra però potenzialità significative. La casistica più recente di progetti realizzati spazia dal disegno industriale, alle installazioni per spazi aperti, alla progettazione di parti di architetture complesse, fino alla progettazione di interi brani di città. Nell’ambito del Disegno Industriale, un esempio di rilievo è quello della sedia “A.I.” disegnata da Philippe Stark per Kartell<sup>4</sup>; tra gli esempi di installazione, vi è il Dedalus Pavilion, progettato con l’obiettivo della riduzione dell’impatto ambientale da AI Build con la consulenza dello Studio Arup, e costruito utilizzando filamenti biodegradabili<sup>5</sup>; un esempio avanzato di brano di architettura complessa è quello della parete attrezzata lunga un chilometro progettata dallo Studio Softroom per Turkish Airlines all’interno dell’aeroporto di Istanbul<sup>6</sup>; ed un esempio di grandi proporzioni di proposta progettuale urbana interamente supportata da intelligenza artificiale è quello per l’espansione della città di Toronto (abbandonato a seguito della pandemia nel 2020) approntato da Sidewalk Labs (proprietà di Alphabet – Google) per mezzo dello strumento *Delve*, da loro creato<sup>7</sup>.

Zhang, 2022; neural side: Zhang and El-Gohary, 2021), and in the field of operational control of buildings (procedural side: Sterl and Mahdavi, 2022; neural side: Moon *et al.*, 2011), as well as in the field of information extraction from on-field measurements and simulation models (metaheuristic side: Zhang *et al.*, 2022; neuronal side: Liu, 2021).

In the area of architecture, one of the most active research topics is the design of building layouts, which can be considered indicative of the present tendencies. In essence, in this endeavour: (a) generative adversarial networks demonstrated advantages in learning from limited case studies (Luo and Huang, 2022; Chailloux, 2020); (b) convolutional neural networks confirmed their excellence in pattern recognition and generalisation (Gonzalez *et al.*, 2020); (c) neural ap-

plications combined with the organisation of relations through graphs highlighted the advantages deriving from the decomposition of design problems through strategies of the kind “divide and conquer” (Hu *et al.*, 2020); (d) and the generative experiments based on networks of the type transformer/autoencoder highlighted the advantages deriving from strengthening the self-supervised learning capacity (de Miguel Rodríguez *et al.*, 2020). On the side of operative research, experiments aimed at improving the collaboration between man and machine through arrangements of the kind “human-in-the-loop” must be signalled (Hu *et al.*, 2020).

The recourse to artificial intelligence in architectural design today is still a niche approach, but shows significant potential. The emergent case studies span from industrial design to installations

## Oltre il *Deep Learning*

Il vasto numero di applicazioni basate su *deep learning* apparse sulla scena ha anche dato modo di individuare i limiti di tali tecniche, e possibili direzioni di perfezionamento. Vi è, in particolare, un consistente consenso in merito al fatto che alle notevoli capacità dei sistemi basati sul deep learning facciano riscontro: (a) necessità di enormi quantità di dati per l'educazione delle reti; (b) difficoltà di extrapolazione (difficoltà, cioè, ad andare oltre a quanto appreso, per generare il nuovo, l'inaspettato); (c) difficoltà di modellizzazione di logiche di tipo induttivo/deduttivo –corrispondenti al “system 2” di Daniel Kahneman (2011) – controbilanciate da una propensione alla modellizzazione del sistema cognitivo umano intuitivo (il “system 1”); (d) assenza di una struttura interna intelligibile, che va a tutto svantaggio della possibilità di collaborazione tra progettista di architettura e macchina intelligente.

Soluzioni mirate a fornire più struttura alle reti neuronali sono state perseguiti con interessanti risultati da Stanley attraverso l'applicazione di strategie evolutive (Stanley and Miikkulainen, 2002); ma questo indirizzo, per quanto molto promettente, non ha ancora generato una massa critica di ricerche affini.

Tra gli esperti di *deep learning* è oggi diffusa la sensazione che l'avanzamento dello stato dell'arte possa avvenire, oltre che attraverso la creazione di maggiore struttura nelle reti (Mittal *et al.*, 2022), attraverso una sintesi tra approcci “tradizionali”, “simbolici” all'intelligenza artificiale, e approcci “connettivistici”, sub-simbolici (Goyal *et al.*, 2022). La medesima convinzione è anche diffusa tra studiosi operanti nel campo dei sistemi simbolici: non a caso, per vari di questi sistemi sono stati, negli

for open spaces, to the design of parts of complex architectures, to the design of whole parts of cities. In the field of industrial design, the chair “A.I.” entirely designed by Philippe Stark by means of artificial intelligence for Kartell, must be mentioned<sup>4</sup>. Examples of installations include the Dedalus Pavilion, designed targeting deep sustainability (by AI Build with the consultancy of Arup Engineering) and built using biodegradable filaments<sup>5</sup>. A prominent example of complex architecture is that of the one kilometre long plant-hosting wall designed by Studio Softroom for Turkish Airlines in the Istanbul airport<sup>6</sup>; and an outstanding case of urban pursuit is that for the expansion proposal of Toronto (abandoned due to the 2020 pandemic) created by Sidewalk Labs (of Alphabet – Google) entirely defined by means of their in-house-made artificial intelligence tool *Delve*<sup>7</sup>.

### Beyond Deep Learning

The vast number of applications based on deep learning tested in recent years has also helped identify the limits of deep learning techniques themselves, suggesting possible directions for evolution. There is now a substantial consensus that the other side of the remarkable modelling capabilities of deep learning-based applications is constituted by: (a) a need for huge amounts of data to train the networks; (b) a difficulty in extrapolation – that is, in going beyond what has been learned, to generate the new, the unexpected; (c) a difficulty in modelling rationality of an inductive/deductive kind (a task corresponding to that of what Daniel Kahneman (2011) defines “system 2”), counterbalanced by a propensity to model the intuitive human cognitive system (“system 1”); (d) the lack of an intelligible internal

anni, creati moduli sensoriali basati sull'impiego di reti neurali (Rosenbloom *et al.*, 2016).

Nello scenario descritto, l'obiettivo primario appare essere quello di potenziare la capacità di autoapprendimento e generalizzazione basata su piccoli numeri di casi o esperienze (Bengio, 2019). Quali risposte emergeranno in futuro non è ancora dato sapere, ma è verosimile che qualsiasi esse siano, possano portare conseguenze significative sui metodi e sulle procedure adottate dai progettisti di architettura.

### NOTE

<sup>1</sup> Tali sistemi sono chiamati sistemi esperti basati sulla conoscenza e richiedono l'accettazione dell'assunto che l'intelligenza sia modellizzabile attraverso sistemi di simboli (e linguaggi). Le più note applicazioni di questo tipo mirate alla costruzione dell'intelligenza generale artificiale sono costituite dai programmi SOAR (Rosenbloom, *et al.* 1993) e ACT-r (Anderson 1983), tuttora in evoluzione.

<sup>2</sup> Le reti neuronali artificiali sono sistemi di tipo sub-simbolico basati sulla ri-creazione di configurazioni a rete proprie degli apparati neuronali animali, organizzate in livelli sovrapposti.

<sup>3</sup> Le sperimentazioni sulle reti neuronali sono iniziate alla fine degli anni '50, e, dopo una fase quasi-letargica negli anni '70, hanno cominciato una crescita graduale e tuttora in corso.

<sup>4</sup> Available at: <https://www.kartell.com/lv/en/kteu/shop/product/a-i-2-sedia/kar05886ne>.

<sup>5</sup> Available at: <https://parametrichouse.com/daedalus-pavilion>.

<sup>6</sup> Available at: <https://www.dezeen.com/2019/06/14/flow-wall-parametric-wall-design-softroom-istanbul-airport>.

<sup>7</sup> Available at: <https://www.sidewalklabs.com>.

structure, which goes to the detriment of the possibilities of collaboration between man and machine.

Solutions aimed at giving more structure to neural networks have been pursued with good results by Stanley through the application of evolutionary strategies (Stanley and Miikkulainen, 2002), but this very promising direction has not yet generated a critical mass of related research.

Among the experts of deep learning, there is now a diffuse sensation that the advancement of the state of the art may entail, besides the creation of greater structure in artificial neural systems (Mittal *et al.*, 2022), a synthesis between “traditional”, “symbolic” approaches to artificial intelligence and connectivistic, sub-symbolic ones (Goyal *et al.*, 2022). This belief has also matured in scholars operating in the field of symbolic systems for arti-

ficial general intelligence. It is no mere chance that sensory modules based on neural networks have been created for several of those systems (Rosenbloom *et al.*, 2016).

In the described scenery, the next primary goal appears to be to empower self-learning skills with the ability to learn from small pools of examples or experiences (Bengio Y, 2019). It is not yet clear what responses will emerge from this endeavour, but it is likely that, whatever they will be, they could bring significant consequences for the methods and procedures adopted by architectural designers.

### NOTES

<sup>1</sup> These systems are called knowledge-based expert systems, and require the assumption that intelligence can be modelled through symbolic approaches (and languages). The most widely

## REFERENCES

- Ackley, D., Hinton, G., and Sejnowski, T. (1985), "A Learning Algorithm for Boltzmann Machines". *Cognitive Science*, Vol. 9, n. 1, pp. 147-169.
- ACM Transactions on Graphics, Vol. 29, n. 6, Article 181.
- Chaudhuri, S., Kalogerakis, E., Guibas, L., Koltun, V. (2011), "Probabilistic Reasoning for Assembly-Based 3D Modeling", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, n. 4, article 35.
- Akram, M., Rahman, I.A., Memon, I. (2014), "A Review on Expert System and its Applications in Civil Engineering", *International Journal of Civil Engineering and Built Environment*, Vol. 1, n. 1, pp. 24-29.
- Allen, N., Herbert, S. (1972), *Human Problem Solving*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall.
- Bengio Y. (2019), "The Consciousness Prior", *arXiv:1709.08568*
- Boonstra, S., van der Blom, K., Hofmeyer, H., Emmerich, M.T.M. (2020), "Conceptual structural system layouts via design response grammars and evolutionary algorithms", *Automation in Construction*, Vol. 116, 103009.
- Boonstra, S., van der Blom, K., Hofmeyer, H., Emmerich, M.T.M. (2021), "Hybridization of an evolutionary algorithm and simulations of co-evolutionary design processes for early-stage building spatial design optimization", *Automation in Construction*, 124, 103522.
- Chaillou S. (2020), "ArchiGAN: Artificial Intelligence x Architecture", *Architectural Intelligence*, *1st International Conference on Computational Design and Robotic Fabrication*.
- Cortes, C., Vapnik, V. (1995), "Support-vector networks" (PDF), *Machine Learning*, Vol. 20, n. 3, pp. 273-297.
- de Miguel Rodríguez, J., Villafaña, M.E., Piškorec, L., Caparrini, F.S. (2020), "Generation of geometric interpolations of building types with deep variational autoencoders", *Design Science*, 6, 1-35.
- Dorst, K., Cross, N. (2001), "Creativity in the design process: co-evolution of problem-solution", *Design Studies*, Vol. 22, n. 5, pp. 425-437.
- Kahneman D. (2013), *Thinking, Fast and Slow*, New York, Farrar, Straus and Giroux.
- Gan V.J.L. (2022), "BIM-based graph data model for automatic generative design of modular buildings", *Automation in Construction*, 134.
- Brunetti, G.L. (2020), "Increasing the efficiency of simulation-based design explorations via metamodelling", *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 13, n. 1, pp. 79-99.
- Goel, V., Pirolli, P. (1992), "The structure of design problem spaces", *Cognitive Science*, Vol. 16, pp. 395-429.
- Goldberg, D.E. (2002), *The Design of Innovation Lessons from and for Competent Genetic Algorithms*, Berlin, Springer.
- Gonzalez, D., Rueda-Plata, D., Acevedo, A.B., Duque, J.C., Ramos-Pollán, R., Betancourt, A., García, S. (2020), "Automatic detection of building typology using deep learning methods on street level images", *Building and Environment*, 177.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A., Bengio, Y. (2014), "Generative Adversarial Nets", *Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2014)*, pp. 2672-2680.
- Goyal, A., Didolkar, A., Ke, N.R., Blundell, C., Beaudoin, P., Heess, N., Mozer, M., Bengio, Y. (2022), Neural Production Systems, *arXiv:2206.02713*.
- Hochreiter, S., Schmidhuber, J. (1997), "Long Short-Term Memory", *Neural Computation*, Vol. 9, n. 8, pp. 1735-1780.
- Hu, R., Huang, Z., Tang, Y., van Kaick, O., Zhang, H., Huang, H. (2020), "Graph2Plan: Learning Floorplan Generation from Layout Graphs", *ACM Transactions in Graphics*, Vol. 39 n. 4, Article 118.
- LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015), "Deep learning", *Nature*, Vol. 521, n. 7553, pp. 436-444.
- LeCun, Y., Boser, B., Denker, J.S., Henderson, D., Howard, R.E., Hubbard, W., Jackel, L.D. (1989), "Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition", *Neural Computation*, Vol. 1, pp. 541-551.

known applications of such a kind aimed at artificial general intelligence are constituted by SOAR (Rosenbloom, et al. 1993) and ACT-r (Anderson 1983), the evolution of which is still ongoing.

<sup>2</sup>Artificial neuronal networks are sub-symbolic systems based on the re-creation of network configurations typical of animal neuronal systems, organised in superimposed levels.

<sup>3</sup> Experiments on neural networks began in the late 1950s and, after an almost lethargic phase in the 1970s, began a gradual growth which is still ongoing.

<sup>4</sup> Available at: <https://www.kartell.com/lv/en/kteu/shop/product/a-i-2-sedie/kar05886ne>.

<sup>5</sup> Available at: <https://parametrichouse.com/daedalus-pavilion>.

<sup>6</sup> Available at: [https://www.dezeen.com/2019/06/14/flow-wall-paramet-](https://www.dezeen.com/2019/06/14/flow-wall-parametric-wall)

ric-wall-design-softroom-istanbul-airport.

<sup>7</sup> Available at: <https://www.sidewalk-labs.com>.

- LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015), "Deep learning", *Nature*, Vol. 521, pp. 436-444.
- Liu, J., Cao, Y., Xue, Y., Li, D., Feng, L., Chen Y.F. (2021), "Automatic unit layout of masonry structure using memetic algorithm and building information modeling", *Automation in Construction*, 130.
- Liu, J., Wu, Z.K. (2015), "Rule-Based Generation of Ancient Chinese Architecture from the Song Dynasty", *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, Vol. 9, n. 2, Article 7.
- Luo, Z., Huang, W. (2022), "FloorplanGAN: Vector residential floorplan adversarial generation", *Automation in Construction*, Vol. 142, 104470.
- Minsky, M. (1986), *The Society of Mind*, New York, Simon and Schuster.
- Minton, S. (1990), "Quantitative results concerning the utility of explanation-based learning", *Artificial Intelligence*, Vol. 42, pp. 363-391.
- Mittal, S., Bengio, Y., Lajoie G. (2022), "Is a Modular Architecture Enough?", *arXiv:2206.02713*.
- Moon, J.W., Jung, S.K., Kim, Y., Han, S.H. (2011), "Comparative study of artificial intelligence-based building thermal control methods e Application of fuzzy, adaptive neuro-fuzzy inference system, and artificial neural network", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, 2422-2429.
- Newell A., Simon, H.A. (1972), *Human Problem Solving*, Prentice-Hall, New York.
- Newell, A. (1982), "The Knowledge Level", *Artificial Intelligence*, Vol. 18, n.1, pp. 87-127.
- Pearl, J. (1988), *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, San Francisco, California, Morgan Kaufmann.
- Rosenbloom, P.S., Laird, J., Newell, A. (1993), *The SOAR Papers: Research on Integrated Intelligence*, Vol. 1 and 2, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Rosenman, M.A., Gero, J.S., Hutchinson, P.J., Oxman, R. (1986), "Expert systems applications in computer-aided design", *Computer-Aided Design*, Vol. 18, pp. 546-551.
- Rosenbloom, P., Demski A., Ustun V. (2016), "Rethinking Sigma's Graphical Architecture: An Extension to Neural Networks", *International Conference on Artificial General Intelligence*.
- Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. and Williams, R.J. (1987), "Learning internal representations by error propagation", in Rumelhart, D.E. and McClelland, J. L. (Eds.), *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, Vol. 1, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 318-362.
- Schwarz, A., Berry, D.M., Shaviv, E. (1994), "Representing and solving the automated building design problem", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, n. 9, pp. 689-698.
- Sokol, J., Cerezo Davila C., Reinhart C.F. (2017), "Validation of a Bayesian-based method for defining residential archetypes in urban building energy models", *Energy and Buildings*, Vol. 134, pp. 11-24.
- Stanley, K.O., Miikkulainen R. (2002), "Evolving Neural Networks through Augmenting Topologies", Technical Report, The University of Texas at Austin.
- Sterl, S., Mahdavi, A. (2022), "Automated generation of a hierarchical building systems control structure", *Journal of Building Engineering*, Vol. 55, 104646.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Kaiser, L., Polosukhin, I. (2017), "Attention Is All You Need", *arXiv:1706.03762*.
- Wang, X.Y., Zhang K. (2020), "Generating layout designs from high-level specifications", *Automation in Construction*, Vol. 119, 103288.
- Wu, D., Wang, G.G. (2020), "Knowledge-Assisted Optimization for Large-Scale Design Problems. A Review and Proposition", *Journal of Mechanical Design*, 142.
- Xue, X., Zhang, J. (2022), "Regulatory information transformation ruleset expansion to support automated building code compliance checking", *Automation in Construction*, 138.
- Zhang, R., El-Gohary, N. (2021), "A deep neural network-based method for deep information extraction using transfer learning strategies to support automated compliance checking", *Automation in Construction*, 132.

Andrea Tartaglia, <https://orcid.org/0000-0002-8782-5579>

Dipartimento Architettura Ingegneria delle costruzioni Ambiente costruito, Politecnico di Milano, Italia

[andrea.tartaglia@polimi.it](mailto:andrea.tartaglia@polimi.it)

**Abstract.** La crescente performatività degli strumenti di IT per il progetto permettono di delegare intere fasi del processo ideativo e decisionale, con una diffusione di modelli algoritmici, riferibili alla categoria dell'intelligenza artificiale, in grado di automatizzare segmenti importanti, se non l'intero processo di produzione del progetto. La velocità di evoluzione di tali sistemi ci colloca in una continua fase di transizione in cui è necessario riflettere sulla direzione da assumere ripetto alle molteplici opportunità di carattere tecnico e informatico. Il testo analizza i nuovi armamentari strumentali e tecnici riflettendo sui limiti e le opportunità anche rispetto allo specifico disciplinare della Tecnologia dell'Architettura e sull'esigenza di riconsiderare il senso stesso del loro uso.

**Parole chiave:** Generative design; Tecnologia appropriata; Cultura del progetto; Processo progettuale; Progetto necessario.

### Lo scenario di riferimento

Nell'ultimo decennio si è assistito a un progressivo e accelerato sviluppo di metodi e strumenti IT (*Information Technology*) per il progetto e la valutazione delle performance degli interventi edilizi e urbani. Apparati pensati per essere “di supporto”, ma anche quasi alternativi al processo progettuale e, talvolta, del tutto surrogatori. La crescente performatività di tali strumenti consente di “delegare” intere fasi del processo ideativo e decisionale, con una pervasiva diffusione di modelli algoritmici riferibili alla categoria dell'intelligenza artificiale, in grado di automatizzare segmenti importanti, se non l'intero processo di produzione del progetto.

Tuttavia, pur essendo la diffusione dei sistemi digitali nel così detto settore AEC (*Architecture, Engineering & Construction*) in atto da diversi decenni, anche a causa della velocità di evoluzione di tali sistemi, ancora oggi ci troviamo in una fase di transizione in cui è necessario continuare a riflettere sulla direzio-

ne da assumere ripetto alle molteplici opportunità di carattere tecnico e informatico (Sheil *et al.*, 2020) che spesso sembrano essere fine invece che strumento.

Nel contesto attuale infatti le politiche comunitarie e la ricerca spesso individuano, anche nel settore del progetto e delle costruzioni, nelle così dette “tecnologie abilitanti fondamentali” una strada prioritaria su cui concentrare le risorse facendole percepire quasi come una panacea in grado di risolvere i “mali della contemporaneità” (Wessendorf *et al.*, 2021; Parisi *et al.*, 2020; Manzoor *et al.*, 2021; Craveiro *et al.*, 2019).

Uno scenario stimolante, che getta però non poche ombre sulla natura del progetto di architettura. Dal punto di vista metodologico, la riflessione non può esimersi da approfondimenti su come queste innovazioni aprano a «inedite e innumerevoli opportunità di pensiero» (Perriccioli, 2020), ma anche sugli impatti di un impiego acritico di questi strumenti che già ha prodotto esiti progettuali discutibili, proprio per il limite di un approccio specialistico e deterministico che riducono la ricerca progettuale a mero gesto tecnico, ancorché formalmente enfatizzato. Pur ritenendo fondata una evoluzione in chiave generativa del metodo progettuale e degli strumenti a suo supporto, non ci si può esimere dal riflettere sul significato profondo dei processi cognitivi, percettivi, deduttivi, induttivi e abduttivi che contraddistinguono lo sviluppo della conoscenza, la capacità inventiva e il saper fare in rapporto al progetto, così da distinguere tra fine, metodo e strumento, riconducendo quest'ultimo alla corretta dimensione di supporto per una più complessa dimensione olistica del progetto.

Technologies, processes and tools between innovation and design quality

**Abstract.** The growing performance of IT tools for the project allows to delegate entire phases of the conceptual and decision-making process thanks to the diffusion of algorithmic models referable to the category of artificial intelligence capable of automating important segments, if not the entire process of project production. The speed of evolution of these systems places us in a continuous transition phase in which it is necessary to reflect on the direction to be taken with respect to the many technical and IT opportunities. The text analyses the new instrumental and technical tools, reflecting on the limits and opportunities also with respect to the specific discipline of Architectural Technology, and on the need to reconsider the real meaning of their use.

**Keywords:** Generative design; Appropriate technology; Design culture; Design process; Necessary design.

### The reference scenario

The last decade has witnessed a progressive and accelerated development of IT (*Information Technology*) methods and tools for the design and performance evaluation of building and urban interventions. Devices designed to be supportive, but also almost alternative to the design process and, sometimes, completely substitutes. The growing performance of these tools makes it possible to “delegate” entire phases of the conceptual and decision-making process with a pervasive diffusion of algorithmic models, referable to the category of artificial intelligence, capable of automating important segments, if not the entire production process of the project.

However, although the diffusion of digital systems in the so-called AEC (*Architecture, Engineering & Construction*) sector has been underway

for several decades, also due to the speed of evolution of these systems, we are still in a transition phase in which it is necessary to continue reflecting on the direction to take with respect to the many technical and IT opportunities (Sheil *et al.*, 2020), which often seem to be the goal rather than the tool.

In the current context, in fact, Community policies and research often identify, even in the design and construction sector, in the so-called “key enabling technologies”, a priority path on which to concentrate resources, making them perceived almost as a panacea capable of resolving the “evils of contemporaneity” (Wessendorf *et al.*, 2021; Parisi *et al.*, 2020; Manzoor *et al.*, 2021; Craveiro *et al.*, 2019).

A stimulating scenario, which, however, casts quite a few shadows on the nature of the architectural project. From a methodological point of view, the

## La transizione digitale: limiti e prospettive in continua evoluzione

Inizialmente le tecnologie digitali sono state assunte come alternativa strumentale alle tecniche tradizionali per la rappresentazione e formalizzazione delle informazioni con indubbi vantaggi in termini di tempi del processo progettuale, facilità di condivisione, semplificazione nella produzione (si pensi, ad esempio, ai sistemi CAD/CAM) e, non ultimo, di gestione anche rispetto alla fase costruttiva, all'utilizzo e alle successive attività manutentive. Ma da subito erano evidenti gli impatti che tali strumentazioni potevano avere non solo in termini di processi ma anche rispetto all'essenza stessa del progetto nei suoi contenuti creativi e culturali (Bertoldini *et al.*, 1993). Rapidamente si è evidenziata la possibilità di coordinare le molteplici informazioni relative ad un territorio o a un progetto fino alla produzione di veri modelli digitali che promettono di replicare molto fedelmente la realtà e di anticipare gli esiti delle sue trasformazioni (Miettinen and Paavola, 2014).

In tal senso, tuttavia, esistono ancora significativi limiti. Emblematica è la netta dicotomia rispetto alle scale di intervento. La scala territoriale lavora su piattaforme GIS (*Geographic Information System*) mentre per gli edifici si adotta una strumentazione BIM (*Building Information Modeling*). Si tratta di due 'mondi' che interagiscono con grande difficoltà (Guyo *et al.*, 2021) anche se è ben noto, in particolare con riferimento al progetto tecnologico ambientale, come la transcalarità sia imprescindibile per il corretto governo degli esiti degli interventi. Anzi, le sperimentazioni più avanzate richiedono «continue operazioni di *downscaling* e *upscaling* e con mirati processi di feedback, tanto spinti che in alcuni casi si è arrivati all'ipotesi

Inizialmente le tecnologie digitali sono state assunte come alternativa strumentale alle tecniche tradizionali per la rappresentazione e formalizzazione delle informazioni con indubbi vantaggi in termini di tempi del processo progettuale, facilità di condivisione, semplificazione nella produzione (si pensi, ad esempio, ai sistemi CAD/CAM) e, non ultimo, di gestione anche rispetto alla fase costruttiva, all'utilizzo e alle successive attività manutentive. Ma da subito erano evidenti gli impatti che tali strumentazioni potevano avere non solo in termini di processi ma anche rispetto all'essenza stessa del progetto nei suoi contenuti creativi e culturali (Bertoldini *et al.*, 1993). Rapidamente si è evidenziata la possibilità di coordinare le molteplici informazioni relative ad un territorio o a un progetto fino alla produzione di veri modelli digitali che promettono di replicare molto fedelmente la realtà e di anticipare gli esiti delle sue trasformazioni (Miettinen and Paavola, 2014).

di poter parlare di a-scalarità» (Bologna *et al.*, 2021). L'esigenza di multiscalarità nell'applicazione degli strumenti digitali di gestione dei dati in un contesto di modellazione, ma anche computazionale, è ancora più evidente se consideriamo la spinta alla diffusione delle così dette *nature-based solutions* (NBS) (Mussinelli *et al.*, 2018). Soluzioni che raggiungono la loro massima efficacia quando vengono organizzate in sistemi articolati a rete definiti come *Green and Blue Infrastructure* (GBI). Una linea di ricerca che apre a nuove opportunità, quali, utilizzando una definizione di Davide Cerati, il *Nature-based Information Modelling* (NIM), per orientare un uso efficace delle NBS negli interventi di rigenerazione urbana. Infatti, partendo dell'impiego coordinato di strumenti di modellazione e simulazione delle prestazioni ambientali a scala territoriale, urbana e puntuale/edilizia è possibile definire – anche attraverso indicatori – criticità, obiettivi di progetto e opzioni morfologiche e tecnотipologiche (Cerati, 2019).

Indubbiamente le tecnologie digitali hanno anche permesso al progetto, che in origine era un'attività in sequenza di approfondimenti sia specialistici che di scala, di dare concretezza ad un approccio integrato delle diverse competenze (Del Nord, 2013) che, grazie anche ad appositi software, riescono efficacemente ad operare in parallelo all'interno del progetto. Ma se questi strumenti hanno ridotto l'importanza della scala dimensionale nella progettazione, in quanto la scala assume significato solo nel caso si voglia procedere ad una stampa, hanno normalmente mantenuto la sequenzialità nello sviluppo progressivo nella definizione dei contenuti progettuali. Ci si riferisce all'organizzazione delle informazioni nel BIM secondo i così detti LOD (*Level of Definition/Development*) che oggi trovano forse un

reflection cannot avoid exploring how these innovations open up to «unprecedented and innumerable thinking opportunities» (Perriccioli, 2020), but also the impacts of an uncritical use of these tools that has already produced questionable design outcomes, precisely due to the limitation of a specialist and deterministic approach, which reduces design research to a mere technical gesture, even if formally emphasised. While deeming founded an evolution in a generative key of the design method and tools, it is necessary to reflect on the profound meaning of the cognitive, perceptive, deductive, inductive and abductive processes that distinguish the development of knowledge, the inventive capacity and the know-how in relation to the project. This is to distinguish between purpose, method and tool, bringing the latter back to the correct dimension of sup-

port for a more complex holistic dimension of the project.

**The digital transition: constantly evolving limits and perspectives**  
Digital technologies were initially taken on as an instrumental alternative to traditional techniques for representing and formalising information with undoubtedly advantages in terms of design process times, easy sharing, simplified production (think, for example, of CAD/CAM systems), and also in management with respect to the construction phase, use and subsequent maintenance activities. But the potential impacts were immediately evident, not only in terms of processes but also with respect to the very essence of the project in a creative and cultural sense (Bertoldini *et al.*, 1993). The possibility of coordinating the multiple pieces of information relating to a territory or

to a project was quickly highlighted, up to the production of actual digital models that promise to replicate reality very faithfully and to anticipate the results of its transformations (Miettinen and Paavola, 2014).

However, there are still significant limitations. In this sense, the clear dichotomy with respect to the scales of intervention is emblematic. The territorial scale works on GIS (*Geographic Information System*) platforms, while BIM (*Building Information Modeling*) instrumentation is adopted for the buildings. These are two 'worlds' that interact with great difficulty (Guyo *et al.*, 2021), even if it is well known, in particular with reference to the environmental technological project, that transcalarità is essential for the correct control of the outcomes of the interventions. Indeed, the most advanced experimentations require «continuous

downscaling and upscaling operations, and processes of targeted feedback so incisive that, in some cases, it has become possible to speak of a theoretical a-scalarità» (Bologna *et al.*, 2021). The need for multiscalarità in the application of digital data management tools in a modelling context, but also a computational one, is even more evident if we consider the tendency to disseminate the so-called nature-based solutions (NBS) (Mussinelli *et al.*, 2018). Solutions that reach their maximum effectiveness in networked systems defined as *Green and Blue Infrastructure* (GBI). A line of research that opens up to new opportunities, such as, using a definition by Davide Cerati, *Nature-based Information Modelling* (NIM), to guide an effective use of NBS in urban regeneration interventions. In fact, starting from the coordinated use of modelling and simulation tools

significato più attuale nei LOIN (*Level of Information Need*) introdotti dalla norma ISO 19650-1. Tuttavia, non è irrealistico pensare che anche questa sequenzialità possa essere superata rendendo obsolete definizioni e avanzamenti sequenziali del processo progettuale tradizionale. Si stanno sviluppando strumenti che, sulla base di processi automatizzati supportati da librerie informative dei principali prodotti e sistemi edili, pure automatizzati, permettono di introdurre già nella fase preliminare contenuti di dettaglio e verifiche degli esiti tradizionalmente demandate ai successivi livelli di progettazione. Inoltre, gli stessi strumenti permettono di aggiornare e riadeguare “automaticamente” i contenuti e le soluzioni tecniche di dettaglio esecutivo anche a seguito di modifiche significative nelle impostazioni e nei requisiti progettuali in passato possibili solo in fase preliminare o di fattibilità. Tale possibilità permette, quindi, di annullare la tradizionale sequenzialità di preliminare, definitivo ed esecutivo, trasformando il progetto in un percorso a spirale in cui la valutazione di soluzioni aggregative e volumetriche si può alternare alla verifica di alternative impiantistiche, materiche, distributive e tecnologico costruttive. Non solo la sequenzialità scalare, ma anche quella informativa, potrebbero rapidamente perdere di significato all’interno del processo progettuale.

Inoltre, l’approccio computazionale, su cui oggi si sta concentrando l’attenzione nel percorso di digitalizzazione del settore AEC, permette di invertire la tradizionale sequenza “forma-impatti” facendo sì che i dati di partenza, nonché quelli attesi di impatto, permettano, attraverso un’apposita programmazione, di generare la “forma” finale. Si tratta delle versioni più avanzate di modellizzazione progettuale in cui non semplice-

of environmental performance on a territorial, urban and punctual/building scale, it is possible to define – also through indicators – criticalities, project objectives and morphological and techno-typological options (Cerati, 2019).

Digital technologies have undoubtedly allowed the project, which originally was a sequence of in-depth acts both on a specialist level and on a scale one, to give concrete form to an integrated approach of the various skills (Del Nord, 2013) which, thanks also to specific software, are able to operate in parallel within the project. However, if these tools have reduced the importance of the dimensional scale in the design, since the scale takes on meaning only in print, they have normally maintained the sequence of progressive development when defining the design contents. We refer to

the organisation of information in BIM according to the so-called LOD (Level of Definition/Development), which, today, perhaps finds a more current meaning in the LOIN (Level of Information Need) introduced by the ISO 19650-1 standard. However, it is not unrealistic to think that even this sequentiality can be overcome by making definitions and sequential advances of the traditional design process obsolete. New tools are being developed which, thanks to automated processes supported by information libraries of the main products and building systems, which are also automated, make it possible to introduce detailed contents and to check the results already in the preliminary phase. Furthermore, the same tools allow to “automatically” update and readjust the contents and technical solutions of executive detail even following signifi-

mente vengono verificate le performance dell’ipotesi ma sono le performance richieste che generano attraverso algoritmi la soluzione finale. Soluzioni generative che attraverso forme di AI (*Artificial Intelligence*) si presume potranno forse assumere le caratteristiche di un “progetto auto-generativo” che in modo automatico, grazie alle opportunità legate da un lato al machine e deep learning e dall’altro ai big data, potrà migliorare, se non addirittura predisporre, la soluzione finale.

### La cultura del progetto e il “pensiero” digitale

Ragionare sul progetto e i suoi strumenti significa confrontarsi con due questioni aperte. La prima relativa al ruolo dell’architetto all’interno di un modello tecnocratico di gestione delle trasformazioni dell’ambiente (Ostwald, 2010; Biraghi, 2019) e di costruzione degli scenari evolutivi della società di riferimento. La seconda, strettamente correlata, riguarda il concetto stesso di qualità dei manufatti ma anche dei sistemi urbani e territoriali (Schiaffonati, 2022), la cui essenza non può semplicemente essere scomposta nelle diverse componenti specialistiche.

Certamente gli strumenti generativi liberano il progettista, almeno apparentemente, dall’esigenza di un confronto serrato con i caratteri dei luoghi; un confronto spesso demandato a nuove figure tecniche specializzate nell’uso di tali strumenti. Ma il rischio è di sottostimare il ruolo delle valenze culturali del progetto, mai completamente riducibili entro modelli automatizzati. I nuovi livelli di complessità e le nuove sfide – non solo di carattere energetico e climatico, ma anche sociale ed ecologico – che caratterizzano lo scenario operativo contemporaneo richiedono, invece, più alti livelli di consapevolezza degli opera-

cant changes in the settings and design requirements. In the past, this could only be done in the preliminary or feasibility phase. This possibility, therefore, allows to cancel the traditional sequentiality of preliminary, definitive and detailed design, transforming the project into a spiral path in which the evaluation of aggregative and volumetric solutions can be alternated with the verification of plant, material, distribution and construction technological alternatives. Not only the scalar sequence, but also the informational one, could quickly lose its meaning within the design process. Furthermore, the computational approach makes it possible to reverse the traditional “form-impact” sequence by ensuring that the starting data, as well as the expected impact data, allow to generate the final “shape” through special programming. These are the most advanced versions

of design modelling in which the performance of the hypothesis is not merely verified, but it is the required performance that generates the final solution through algorithms. Generative solutions that through forms of AI (artificial intelligence) will perhaps be able to assume the characteristics of a “self-generative project” that will automatically be able to improve, if not prepare, the final solution thanks to the opportunities linked to machine and deep learning on the one hand, and to big data on the other.

### The culture of design and digital “thinking”

Thinking about the project and its tools means dealing with two open questions. The first related to the role of the architect within a technocratic model for managing environmental transformations (Ostwald, 2010;

tori del processo (Magarò, 2021), per non deprimere la capacità predittiva e prefigurativa del progetto alla mera identificazione di parametri prioritari su cui declinare ingegneristicamente soluzioni tecniche preconfezionate.

Un progetto “esclusivamente” generativo basato sulla AI rappresenta un importante ambito di ricerca da approfondire in tutti i suoi risvolti. In architettura è spesso successo che la ricerca, pur distaccandosi da obiettivi imprescindibili nel progetto di architettura, come la qualità della vita e dell’ambiente costruito, abbia sviluppato interessanti riflessioni che poi, ricondotte all’interno del contesto operativo diffuso, hanno significato un avanzamento del sapere architettonico e un importante arricchimento dell’armamentario dei progettisti. Pensiamo al significato delle “architetture interrotte” e dell’“architettura disegnata” (Branzi, 1976) o agli studi sviluppati da Greg Lynn partendo dai *Binary Large Object* in cui il tema della costruitabilità spesso non entrava nei ragionamenti formali (Tartaglia, 2021). Allo stesso modo potremmo anche riflettere su come nel recente passato ragionamenti di carattere filosofico e sociologico, ed estranei ad una visione algoritmica, siano poi diventati riferimenti centrali nel dare senso a scelte progettuali in discontinuità con la tradizione. Basti pensare a quanti architetti hanno supportato le proprie proposte progettuali appoggiandosi esplicitamente alle riflessioni teoriche di Jacques Derrida. Ma anche matematica e geometria hanno, talvolta, rappresentato una strada da seguire per gli architetti, pur non sempre con reale coerenza e rigore. Usi più o meno raffinati che però evidenziano come il progetto di architettura, talvolta, si concentri solo su alcuni aspetti della complessità rappresentata dal sapere e dal pensiero umano, specchio di una realtà forse ancora più

complessa. Può essere che in questa fase ci si stia appiattendo su un percorso digitale che oggi ci sembra totalitario e conclusivo. Ma anche in questo senso la storia dell’architettura ha più volte confutato le visioni che ipotizzavano il raggiungimento di una fase definitiva di sviluppo del pensiero progettuale.

### Il progetto tra fine e mezzo

Oggi siamo nell’era del progetto digitale in cui la qualità della soluzione può essere misurata anche nella coerenza del processo generativo e nella raffinatezza degli algoritmi che la producono. Una visione che però spesso porta alla definizione di meri “oggetti”, seppur complessi e di sicuro interesse tecnico, per cui il contesto fisico in cui si collocano assume significato solo rispetto ai contenuti che possono essere modellizzati e contemplati nel “gemello digitale” che diviene la “vera realtà di riferimento”. Non a caso alcune università stanno iniziando, a partire dal mondo dell’architettura, ad attivare corsi riferiti al solo metaverso come nuova opportunità e spazio operativo per gli architetti.

Tuttavia, la realtà e l’essere umano hanno ancora dei livelli di complessità che il mondo digitale può solo parzialmente replicare e cercare di inseguire attraverso l’uso sempre più massiccio di dati nei processi di deep learning. Realtà virtuale, realtà aumentata, e tutte le ulteriori declinazioni che può assumere l’ampia idea di metaverso, rappresentano certamente un’opportunità alternativa e complementare alla “sola” realtà fisica dell’ambiente e dei sistemi ecologici e culturali in cui viviamo, ma certamente non possono essere ad essa sostitutive (almeno per ora), ed anzi la ricerca sta indagando nuove forme collaborative tra questi due “mondi” (Dellermann *et. al.*, 2019).

Biraghi, 2019) and for building evolutionary scenarios for society. The second, which is closely related to the former, concerns the concept of quality of the artefacts but also of the urban and territorial systems (Schiaffonati, 2022), whose essence cannot simply be broken down into the various specialised components.

At least apparently, generative tools release the designer from the need for a close confrontation with the characteristics of the places; an activity often entrusted to new technical figures specialised in the use of these tools. But the risk is to underestimate the role of the cultural values of the project, which can never be completely reduced within automated models. The new levels of complexity and the new challenges - not only of an energy and climatic nature, but also social and ecological - that characterise the con-

temporary operating scenario require higher levels of awareness of the process operators (Magarò, 2021). This is in order not to reduce the predictive and prefigurative capacity of the project to the mere identification of priority parameters on which to engineer pre-packaged technical solutions.

An “exclusively” generative project based on AI is an important research area to be explored in all its aspects. In architecture, it has often happened that research, while detaching itself from essential objectives in the architectural project, such as the quality of life and the built environment, has developed interesting reflections that, brought back within the widespread operational context, have meant an advance of architectural knowledge and an important enrichment of the designers’ equipment. We can mention the meaning of “interrupted architectures” and

of “drawn architecture” (Branzi, 1976) or of the studies developed by Greg Lynn starting from *Binary Large Objects* in which the theme of constructability often did not enter into formal reasoning (Tartaglia, 2021). In the same way, we could also think of how, in the recent past, philosophical and sociological reasoning, unrelated to an algorithmic vision, became central references in giving meaning to design choices in discontinuity with tradition. Suffice to consider how many architects have supported their design proposals by relying explicitly on the theoretical reflections of Jacques Derrida. But even mathematics and geometry have sometimes represented a path for architects, although not always with real coherence and rigour. More or less refined uses which, however, show how the architectural project sometimes focuses only on some aspects of

the complexity represented by human knowledge and thought, a mirror of a perhaps even more complex reality. Maybe in this phase we are flattening ourselves on a digital path that today seems totalitarian and conclusive. Also in this sense, the history of architecture has repeatedly refuted the visions that hypothesised the achievement of a definitive development phase of design thinking.

### The project between aim and tool

Today we are in the digital design era in which the quality of the solution can also be measured in the coherence of the generative process and in the refinement of the algorithms that produce it. A vision which, however, often leads to the definition of mere “objects”, albeit complex and certainly of technical interest, for which the physical context in which they are placed

Realtà che in ogni caso non rappresenta un riferimento statico e immobile. È utile ricordare quanto scriveva Peter Rice: «L'idea che esista una soluzione univoca per un problema tecnico è molto diffusa. Una soluzione tecnica, invece, come ogni altra scelta, è un fatto contingente, non definitivo. Quella decisione è il risultato di un complesso processo in cui viene analizzata una massa d'informazioni, per giungere a una precisa opzione sulla base dei dati. Si tratta di un evento legato al tempo e allo spazio, in cui le persone, il loro background culturale e il loro talento giocano un ruolo di primaria importanza» (Rice, 1987).

Gli elementi citati da Peter Rice sono quelli che danno “significato” alle soluzioni. Si tratta di elementi per definizione mutevoli o dinamici che non possono essere congelati e permanere se non all'interno di una visione metafisica dell'architettura. Elementi che permangono anche all'interno dell'epoca digitale/generativa. Oggi il tema si deve allargare anche a chi predispone gli strumenti informatici. Infatti, anche se «gli apparati tecnici, cessando di essere mezzi, sono divenuti pre-decisioni, decisioni che sono state prese prima che gli uomini fossero nelle condizioni di stabilire degli scopi corrispondenti, finendo per assumere sempre più le sembianze di oggetti dotati di una vita autonoma» (Russo Ermolli, 2020), il progettista deve continuamente fare memoria del loro essere mezzi/strumenti nati dalla mutevole soggettività umana.

### Il progetto tra possibile e necessario

Il nuovo armamentario strumentale a disposizione del progetto sommato alle innovazioni tecniche nel mondo dei materiali e delle componenti edilizie, rappresentano una opportunità che può favorire la qualità degli

takes on meaning only with respect to the contents that can be modelled and contemplated in the “digital twin”, which becomes the “true reality of reference”. It is no coincidence that some architecture universities are activating courses referring only to the metaverse as a new opportunity and operational space for architects.

However, reality and human beings still have levels of complexity that the digital world can only partially replicate and try to pursue through the increasingly massive use of data in deep learning processes. Virtual reality, augmented reality, and all the further declinations that the broad idea of metaverse can assume, certainly represent an alternative and complementary opportunity to the “only” physical reality of the environment and of the ecological and cultural systems in which we live. But certainly they cannot be substitutes for it (at least

for now). Indeed, research is investigating new forms of collaboration between these two “worlds” (Dellermann et. al, 2019).

Reality that in any case does not represent a static and immobile reference. It is useful to remember what Peter Rice wrote: «the idea that there is a unique solution to a technical problem is very widespread. A technical solution, on the other hand, like any other choice, is a contingent fact, not a definitive one. That decision is the result of a complex process in which a mass of information is analysed to arrive at a precise option based on the data. It is an event linked to time and space, in which people, their cultural background and their talents play a role of primary importance» (Rice, 1987).

The elements mentioned by Peter Rice are those which give “meaning” to the solutions. These are by defini-

esiti progettuali in termini di performance ambientali, qualità fruibile e abitativa, rispondenza al quadro esigenziale e prestazionale, uso appropriato delle risorse, velocizzazione dei processi decisionali, delle tempistiche produttive e realizzative nonché di controllo dei costi. Strumenti che spingono a riorganizzare le mappe concettuali e operative spesso basate su processualità non più coerenti con la possibilità di gestire gradi di complessità sempre più elevati, anche attraverso più veloce, se non istantaneo, confronto tra le alternative possibili.

Le possibilità aumentano in modo esponenziale, superando spesso le aspettative o le necessità della società e della domanda reale, e, talvolta, sviluppate senza reali valutazioni nel e di merito. Lo scenario apre quindi, anche se in modo certamente meno drammatico, a riflessioni con cui si sono già confrontate alcune scienze “dure” oltre alle scienze mediche. Approfondimenti relativi a dove porre, nel progetto e nell'applicazione delle innovazioni, il limite tra possibile e necessario.

Tema che merita un approfondimento anche di carattere etico. I progettisti, che intervenendo sull'ambiente hanno un ruolo pubblico o almeno lo sono gli impatti delle loro azioni, si trovano di fronte alla necessità di ridefinire i propri obiettivi e la semantica della qualità in architettura e nel progetto. In questo senso il settore scientifico della Tecnologia dell'Architettura, che per primo aveva affrontato il tema ambientale e climatico, dell'accessibilità, del corretto uso delle risorse, non può esimersi dal recuperare e rilanciare il filone di ricerca relativo della tecnologia appropriata (Gangemi, 1991). I nuovi armamentari strumentali e tecnici, infatti, devono trovare la loro ragione, nella coerenza con obiettivi da riperimetrare e ridefinire, con uno sguardo di lungo periodo per una società in profonda evo-

tion changeable or dynamic elements that cannot be frozen and remain only within a metaphysical vision of architecture. Elements that remain even within the digital/generative age. Today the theme must be extended to those who prepare the IT tools, too. In fact, even if «technical apparatuses, ceasing to be means, have become pre-decisions, decisions that were taken before men were in a position to establish corresponding goals, ending up increasingly taking on the appearance of objects endowed with an autonomous life» (Russo Ermolli, 2020), the designer must continually remember that they are tools/instruments born of changing human subjectivity.

### The project between possible and necessary

The new instrumental equipment available to the project, added to the

technical innovations in the world of materials and building components, is an opportunity that can promote: the quality of the design outcomes in terms of environmental performance; the quality of use and housing, compliance with the requirement and performance framework; the appropriate use of resources, speeding up decision-making processes, production and implementation times; cost control. Such tools encourage the reorganisation of conceptual and operational maps often based on processes that are no longer consistent with the possibility of managing increasingly higher degrees of complexity, even through a faster, if not instantaneous, comparison between possible alternatives.

The possibilities increase exponentially, often exceeding the expectations or needs of the society and the actual demand. At times they are developed

luzione che sta drammaticamente vivendo gli effetti di un modello di sviluppo autoreferenziale, tecnocratico e specialistico in cui troppo spesso il mezzo è stato confuso con il fine. Una nuova sfida che coinvolgerà anche il progetto tecnologico ambientale, i suoi contenuti, i suoi modelli operativi ma anche le sue ragioni fondative in termini di obiettivi e priorità.

## REFERENCES

- Bertoldini, M., Nardi, G. and Talamo, C. (1993) (Eds), *Poiesis. L'informatica nel progetto euristico*, CittàStudi.
- Biraghi, M. (2019), *L'architetto come intellettuale*, Einaudi.
- Bologna, R., Mussinelli, E. and Tucci, F. (2021), "Metodi e strumenti del progetto ambientale / Environmental design methods and tools", in Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E. and Tucci, F. (Eds.), *Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico / From Urban Districts to Eco-districts. Knowledge Methodologies, Strategic Programmes, Pilot Projects for Climate Adaptation*, MaggioliEditore.
- Branzi, A. (1976), "Architettura disegnata", *DATA*, Vol. 23, pp. 72-73.
- Cerati, D. (2019), *Nature-based Solutions and open spaces regeneration. Methods, tools and indicators for environmental design and assessment*, PhD Thesis, Politecnico di Milano.
- Craveiro, F., Pinto Duartec, J., Bartolo, H. and Bartolo, P.J. (2019), "Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0", *Automation in Construction*, Vol. 103, pp. 251-267.
- Dellermann, D., Ebel, P., Söllner, M. and Leimeister, J.M. (2019), "Hybrid Intelligence", *Business & Information Systems Engineering*, Vol. 61, pp. 637-643.
- Del Nord, R. (2013), "Rinnovare i modelli di processo con la progettazione digitale multidisciplinare: la sfida lanciata da ADITAZZ nel concorso internazionale Small Hospital – Big Ideas", *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 6/2013, pp. 22-27.
- Gangemi, V. (1991) (Ed), *Architettura e tecnologia appropriata*, Franco Angeli.
- Guyo, E., Hartmann, T. and Ungureanu, L. (2021), "Interoperability between BIM and GIS through opendata standards: An overview of current literature", in Poveda-Villalón, M. and Pauwels, P. (Eds) LDAC2019th Linked Data in Architecture and Construction Workshop, pp. 115-126.
- Magarò, A. (2021), *Valutazione multi-criteriale della sostenibilità nel processo progettuale generativo*, Edizioni ETS.
- Manzoor, B., Othman, I. and Pomares, J.C. (2021), "Digital Technologies in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry—A Bibliometric—Qualitative Literature Review of Research Activities", *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021, Vol. 18, p. 6135.
- Miettinen, R. and Paavola, S. (2014), "Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling", *Automation in Construction*, Vol. 43, pp. 84-91.
- Mussinelli, E., Tartaglia, A., Bisogni, L. and Malcevschi, S. (2018), "The role of Nature- Based Solutions in architectural and urban design", *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 15/2018, pp. 116-123.
- Ostwald, M.J. (2010), "Ethics and the auto-generative design process", *Building Research & Information*, Vol. 38, n. 4, pp. 390-400.
- Parisi, F., Mangini, A.M. and Fanti, M.P. (2020), "Enabling Technologies for Smart Construction Engineering: a Review", in 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pp. 1546-1551.
- Perriccioli, M. (2020), "Complessità e ambiguità della cultura digitale", in Russo Ermolli, S., *The digital culture of architecture*, Santarcangelo di Romagna, Maggioli Editore, pp. 9-18.

without real evaluations of the situation. The scenario, therefore, opens up, albeit in a certainly less dramatic way, to reflections already discussed by some "hard" sciences in addition to the medical sciences, to insights on where to place the limit between possible and necessary in the design and application of innovations.

A topic that deserves further study, also of ethical aspects. Designers, who by intervening on the environment have a public role or at least the impacts of their actions do, are faced with the need to redefine their objectives and the semantics of quality in architecture and project. In this sense, the scientific sector of architectural technology, which was the first to deal with the environmental and climatic themes, the accessibility and the correct use of resources, cannot avoid recovering and relaunching the related research line

of appropriate technology (Gangemi, 1991). In fact, the new instrumental and technical paraphernalia must find a reason, in coherence with objectives to be redefined, with a long-term view of a society undergoing profound evolution that is dramatically experiencing the effects of a self-referential, specialist and technocratic development model in which the means has too often been confused with the aim. A new challenge that will also involve the environmental technological project, its contents, its operating models but also its founding reasons in terms of objectives and priorities.

Rice, P. (1987), "Il punto di vista di Peter Rice. An engineer's view", *L'Arca. The international magazine of architecture, design and visual communication*, p. 70-75.

Russo Ermolli, S. (2020), *The digital culture of architecture. Note sul cambiamento cognitivo e tecnico tra continuità e rottura*, Santarcangelo di Romagna, Maggioli Editore.

Schiaffonati, F. (2022), *Identità di una città. Pensieri, critiche, progetti*, INVICEM (pubblicazione fuori commercio).

Sheil, B., Tamke, M. and Ramsgaard Thomsen, M. (2020) (Eds), *Design Transactions. Rethinking Information Modelling for a New Material Age*, UCL Press.

Tartaglia, A. (2021), "Contemporaneità e progetto", in Magarò, A., *Valutazione multi-criteriale della sostenibilità nel processo progettuale generativo*, Edizioni ETS, pp. 9-13.

Wessendorf, C., Kopka, A., Fornahl, D. (2021), "The impact of the six European Key Enabling Technologies (KETs) on regional knowledge creation", in *Papers in Evolutionary Economic Geography (PEEG) 2127*, Utrecht University, Department of Human Geography and Spatial Planning, Group Economic Geography.

# Supporto o automazione nelle decisioni: il ruolo dell'intelligenza artificiale per il progetto

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

SAGGI E PUNTI  
DI VISTA/  
ESSAYS AND  
VIEWPOINT

Tiziana Ferrante<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0625-4453>

Federica Romagnoli<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-5520-3356>

<sup>1</sup> Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura Sapienza Università di Roma, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Italia

tiziana.ferrante@uniroma1.it  
federica.romagnoli@uniroma1.it

**Abstract.** L'introduzione (oggi più accelerata e pervasiva) dell'intelligenza artificiale per operare all'interno della complessità del mondo che ci circonda, continua ad alimentare il dibattito scientifico, filosofico e politico. Anche nel settore delle costruzioni (seppur ancora in fase embrionale) è possibile osservare i primi esiti concreti, frutto dell'applicazione di nuovi processi digitali sempre più autonomi, a supporto della concezione, definizione e validazione del progetto.

Le nuove frontiere di espansione dei sistemi di intelligenza artificiale, incoraggiate dalla transizione digitale, impongono un'attenta riflessione sull'impatto che le nuove tecnologie determinano nel ridefinire il ruolo del progettista all'interno del processo decisionale.

**Parole chiave:** Intelligenza artificiale; Processo decisionale; Progetto; Innovazione tecnologica.

## La corsa all'intelligenza artificiale

Secondo Ray Kurzweil, nel 2030 l'intelligenza artificiale raggiungerà quella umana (Kurzweil, 2006).

La volontà di sopperire alle mancanze 'naturali' con strumenti 'artificiali' ha accompagnato l'evoluzione della civiltà sin dalle sue origini. Come ampiamente trattato da Herbert Simon, "artificiale" ("fatto dall'uomo"), è tutto ciò che è "adatto agli obiettivi e agli scopi dell'uomo" e «come cambiano gli obiettivi dell'uomo, così cambiano gli artefatti» (Simon, 1996). Poiché, parafrasando Aristotele, «tutti gli uomini aspirano per natura al sapere»<sup>1</sup>, a muovere il progresso tecnologico è dunque la tensione continua generata dal desiderio di comprensione di ciò che 'è' e, ancor di più, dall'ambizione di previsione di 'ciò che sarà'.

Una vocazione innata verso l'anticipazione che ci spinge a progettare, a 'proiettare in avanti' una serie di azioni con l'auspicio di indirizzare il futuro verso prospettive di vita migliori, e a

dotarci di mezzi sempre più potenti (tecnologie abilitanti) per aumentare la conoscenza del mondo che ci circonda e di operare all'interno della sua complessità.

Lo sviluppo esponenziale delle tecnologie informatiche e delle telecomunicazioni ha innescato il fenomeno globale della transizione digitale le cui conseguenze economiche, sociali e culturali condizionano la nostra società dell'informazione in modo sempre più evidente. Uno scenario che impone di ragionare sugli effetti generati non dalle azioni dei singoli, bensì dallo scambio di informazioni (dati) attraverso le relazioni immateriali (connessioni) che strutturano una "network society" (Castells, 1996).

Le recenti innovazioni relative ai meccanismi di apprendimento automatico in grado di elaborare l'enorme quantità di dati oggi disponibili hanno portato nuovamente al centro del dibattito scientifico, filosofico e politico l'intelligenza artificiale (IA)<sup>2</sup>, definita in ambito europeo come una "tecnologia abilitante fondamentale", che mira ad automatizzare uno o più processi cognitivi (umani), che fornisce previsioni, raccomandazioni o decisioni per raggiungere obiettivi specifici, imparando continuamente dall'ambiente in cui si trova, o dai risultati delle sue stesse azioni (European Commission, 2020).

Sebbene sia stato argomentato come il comportamento dei sistemi di IA, pur ispirandosi alle reti neurali biologiche, poco abbia a che vedere con il concetto di "intelligenza" stessa (Crawford, 2021), le abilità 'altre' esibite dalle macchine (velocità di calcolo e capacità di memoria ineguagliabili dalla mente umana) stanno rendendo ormai irrinunciabile il loro impiego a supporto del

## Support or automation in decision-making: the role of artificial intelligence for the project

**Abstract.** The increasingly pervasive use of artificial intelligence within the complexity of the world around us continues to fuel the scientific, philosophical, and political debate. Even within the construction sector (although still in an embryonic phase), it is possible to observe the first concrete results of the application of new digital processes, which are increasingly autonomous and support the design, definition, and validation of the project. The new frontiers of expansion of artificial intelligence systems, encouraged by the digital transition, require a careful reflection on the impact of new technologies in redefining the designer's role in the decision-making process.

**Keywords:** Artificial intelligence; Decision-making; Architectural design; Technological innovation.

## The race for artificial intelligence

According to Ray Kurzweil, artificial intelligence will reach human intelligence in 2030 (Kurzweil, 2006).

The desire to compensate for natural shortcomings with artificial tools has accompanied the evolution of civilisation since its origins. As extensively treated by Herbert Simon, "artificial" ("man-made") is all that is "adapted to human goals and purposes" and «as our aims change, so too do our artefacts and vice versa» (Simon, 1996). Since, paraphrasing Aristotle, «all men by nature desire knowledge»<sup>1</sup>, the continuous tension generated by the desire to understand what *is* and, even more, by the ambition to predict what *will be* is what moves technological progress. An innate calling for anticipation pushes us to design and to project forward a series of actions with the hope of directing the future towards better

life prospects. This drives us to provide ourselves with powerful means (enabling technologies) to increase our knowledge of the world around us and to operate within its complexity.

The exponential development of information technologies and telecommunications has triggered the global phenomenon of digital transition, whose economic, social, and cultural consequences increasingly affect our information society. This is a scenario that requires a study of the effects generated not by the actions of individuals but by the exchange of information (data) through immaterial relationships (connections) that structure a "network society" (Castells, 1996).

The recent innovations in machine learning mechanisms, capable of processing the vast amount of data available today, have again put artificial intelligence (AI)<sup>2</sup> at the centre of the

processo decisionale nella risoluzione di problemi sempre più complessi, dimostrando potenzialità di applicazione in tutti i settori, compreso quello delle costruzioni.

Un settore, quello delle costruzioni, energivoro e vulnerabile dal punto di vista produttivo, affetto da criticità radicate (ritardi, performance disattese, perdita di informazioni tra le diverse fasi di processo, ecc.) che ne limitano lo sviluppo e che trovano nella transizione digitale attraverso il *Building Information Modeling* (prima)<sup>3</sup> e nell'adozione di sistemi di IA (come applicazione conseguente) una possibile soluzione. Una transizione che riconosce la centralità del progetto come momento decisivo per l'efficacia dell'intero processo edilizio, chiamato a generare un *unicum* la cui qualità è frutto della correlazione tra i diversi saperi che, poiché di paritaria importanza, devono convergere secondo una logica integrata e non sequenziale.

In coerenza con questa visione (fondata sulla definizione e sullo scambio delle 'informazioni' geometriche, prestazionali, processuali, ecc.), l'impiego di nuove logiche decisionali *data-driven*, supportate dall'IA, consentirebbe di prevenire e ridurre gli errori e ottimizzare l'uso di risorse, attuando scelte maggiormente informate, in tempi ridotti e basate su una maggiore accuratezza delle previsioni<sup>4</sup>. Tuttavia, ancora oggi, il settore delle costruzioni rimane uno dei meno digitalizzati (ECSO, 2021). Una 'lentezza' che, se da un lato ostacola l'impiego dei sistemi di IA (basati sulla disponibilità, numerosità e strutturazione dei dati), dall'altro ci consente di mettere a fuoco (e più criticamente) i profondi cambiamenti che l'introduzione di processi digitali in grado di prendere decisioni in modo sempre più autonomo rappresentano per l'attività progettuale del prossimo futuro. Cambiamenti che impongono (già oggi) nel campo

scientific, philosophical and political debate. In the European institutional framework, AI has been defined as a "key enabling technology", which aims to automate one or more cognitive (human) processes, providing predictions, recommendations, or decisions to achieve specific objectives, continuously learning from the environment in which it is located, or from the results of its actions (European Commission, 2020).

It has already been argued that AI systems, while inspired by the functioning of biological neural networks, are not comparable to "intelligence" itself (Crawford, 2021). However, the machines' abilities (calculation speed and memory capacity unmatched by the human mind) are now becoming indispensable to support the decision-making process in resolving increasingly complex problems, demonstrat-

ing their potential for application in all sectors, including construction. The construction sector is energy-consuming, vulnerable in productivity, and affected by 'deeply rooted' weaknesses (delays, missed performance, loss of information in the process phases, etc.) that limit its growth. These challenges find a possible solution in the digital transition initially through Building Information Modelling<sup>3</sup>, and then with the adoption of AI systems as a consequent application. It is a transition that recognises the centrality of the project as a decisive moment for the effectiveness of the entire building process, which is called to generate a *unicum* where the quality is the result of the combination of different types of knowledge, which must converge in an integrated way as they are equally important. In line with this vision (based on the definition and exchange of geometric,

della progettazione una riflessione su 'cosa' sia effettivamente opportuno delegare ai mezzi, avendo contezza oltre che dei benefici ottenibili, anche (e soprattutto) dei potenziali rischi che, come avviene in altri ambiti di applicazione dell'IA più maturi, rendono urgente stabilire strategie condivise tra gli operatori per uno sviluppo etico e responsabile<sup>5</sup> dei nuovi strumenti di cui si dispone (Tegmark, 2018). In relazione a questo contesto, l'obiettivo del contributo è quello di individuare, attraverso l'esemplificazione di alcune opere realizzate avvalendosi delle più recenti applicazioni dell'IA, quelle possibili modalità virtuose di interazione che consentono di mantenere un controllo 'consciente' ed esperto da parte dell'uomo nel processo decisionale del progetto di Architettura.

### Intelligenza artificiale e progetto di Architettura

Anche in Architettura, le nuove esigenze della società incoraggiano l'adozione di strumenti innovativi tesi a supportare le decisioni in un contesto di complessità crescente, per la concezione, definizione e validazione del progetto (Ferrante, 2020).

La progettazione architettonica, per la sua peculiare multidimensionalità e multiscalarità, pone un insieme di problemi 'wicked' (Rittel and Webber, 1973), indeterminati e complessi a tal punto da non ammettere soluzioni univoche. Per tale motivo, i processi che sottendono un pensiero matematico (algoritmico), incontrano serie difficoltà di applicazione, tanto che in questo ambito l'IA si trova ancora in una fase embrionale (ECSO, 2021). A partire dagli anni '60, le ricerche condotte nel tentativo di stabilire una scienza della progettazione (un "design method"<sup>6</sup>) hanno portato a individuare due 'processi mentali': il *design*

performance, procedural, etc. information), the use of a new data-driven decision-making rationale, supported by AI, offers the possibility of preventing and reducing errors, and of optimising the use of resources, implementing more informed choices in a shorter time thanks to the greater accuracy of forecasts<sup>4</sup>. However, the construction sector still remains to date one of the least digitised (ECSO, 2021). This slowness hinders using AI systems (based on availability, number, and quality of data). However, it allows us to focus (and more critically) on the profound changes that the introduction of digital processes, capable of making decisions independently, will represent for the design activity in the near future. In the design field, these changes require (already today) some reflection on what is appropriate to delegate to the machine, considering not only the benefits but

also (and above all) the potential risks. This concern makes it urgent to establish shared strategies for the ethical and responsible<sup>5</sup> development of new AI systems (Tegmark, 2018), as occurred in other areas where AI application is more mature.

In relation to this context, the contribution aims to identify, through the exemplification of some works implemented with the most recent applications of AI, the possible virtuous modes of interaction that allow for the maintenance of a 'conscious' and expert control by humans in the decision-making process of Architectural design.

### Artificial intelligence and Architectural design

Even in Architecture, the new needs of society encourage the adoption of innovative tools to support the decision-

*thinking* (Cross, 1999) il *computational thinking* (Wing, 2006), per risolvere problemi progettuali e studiarne la trasferibilità all'IA. Oggi, gli studi in tale ambito paragonano l'attività progettuale ad un modello duale, che prevede continui passaggi sempre più fluidi tra i due processi distinti, ma complementari (Kelly and Gero, 2021).

Se si considera il progetto come *data-process*, è chiaro come la sua qualità dipenda da una gestione ampia, sistemica e integrata delle relazioni tra tutte le informazioni che lo caratterizzano. Secondo chi ripone maggiori aspettative nelle nuove tecnologie, questa attività gestionale potrebbe essere in parte svolta da sistemi di IA in grado di 'apprendere' autonomamente dalla mole di dati e di suggerire output sulla base della propria 'conoscenza' (associazioni elaborate secondo metodi statistici).

Un'eventualità che determinerebbe confini di competenza tra l'uomo e il computer sempre più sfumati e che rende opportuno distinguere tra un meccanismo "automatico" ("che si muove da sé"), un esecutore di operazioni che genera risultati sulla base di precisi input, e un sistema "autonomo" (letteralmente "che ha in sé le proprie leggi") che, come nel caso dell'IA, elabora dati e genera risultati senza l'intervento diretto del progettista (Bernstein, 2022). Tuttavia, questi sistemi ad oggi possono operare autonomamente solamente all'interno di domini rigidi e circoscritti, per raggiungere obiettivi specifici. Un'IA 'debole' ("Weak AI") che possiede un'autonomia ben lontana da quella che Kant nella *"Critica della ragion pratica"*, definisce come "determinarsi della volontà", frutto di un'intelligenza 'forte' ("General AI") che per essere tale deve possedere coscienza (Damasio, 2022) e comprendere la causalità tra gli eventi (Pearl and Mackenzie, 2018).

making process in a context of increasing complexity for design conception, definition, and validation (Ferrante, 2020).

The field of architectural design, due to its peculiar multi-dimensional and multi-scale properties, poses a set of 'wicked' problems (Rittel and Webber, 1973), indeterminate and complex to the point of not admitting unique solutions. For this reason, the processes based on mathematical (algorithmic) thinking are challenging to apply. In fact, AI in Architectural design is still in an embryonic stage (ECSO, 2021). Since the 1960s, research conducted to establish a science of design (a "design method") has led to the identification of two mental processes to address design problems and their transferability to AI: design thinking (Cross, 1999) and computational thinking (Wing, 2006). Today, studies in this field por-

tray design activity as a 'dual' model, involving continuous and increasingly fluid transitions between the two distinct but complementary processes (Kelly and Gero, 2021).

Considering the project as a 'data-process', it is clear that its quality depends on comprehensive, systemic and integrated management of the relationships between all of its information. According to those who place higher expectations on new technologies, this managerial activity could be partly carried out by AI systems capable of autonomously learning from the mass of data and of suggesting outputs based on their own form of knowledge (associations established according to statistical methods).

This scenario would determine blurred boundaries of competence between man and computer, and would make it appropriate to distinguish between an

### Alcuni esiti tangibili

Nella ricerca accademica, la sperimentazione di nuove tecniche di IA e delle potenziali applicazioni nel settore delle costruzioni è in forte fermento e, per quanto attiene alla specifica fase di progettazione, è possibile fare riferimento a due strategie principali (Leach, 2021).

Una prima strategia prevede l'applicazione della classe di metodi del General Adversarial Network (Goodfellow *et al.*, 2014) per la generazione autonoma, da parte del computer, di immagini inedite a partire da relazioni 'auto-apprese' processando in fase di training l'insieme di dati (immagini, grafici, numeri, ecc.) con cui è stato alimentato. Questi metodi sono stati sperimentati per produrre immagini (*machine hallucinations*) relative a porzioni di edifici più o meno fotorealistiche (Fig. 1) e planimetrie bidimensionali (Fig. 2).

Tuttavia, più che porre l'accento su un aspetto 'visivo', formale, della rappresentazione architettonica, in coerenza con l'approccio tecnologico al progetto, fondato sulla cultura della realizzazione, è opportuno interrogarsi sui vantaggi che l'IA può offrire per un maggiore controllo sulla fattibilità dell'opera, elevando la qualità del progetto (e, di conseguenza, la qualità dell'intervento) operando nel rispetto di un contesto non solo ambientale (fisico), ma anche storico, culturale, sociale e potenziando la risposta prestazionale (funzionale, energetica, strutturale, ecc.). Più in linea con tale indirizzo, le strategie appartenenti al secondo ambito di indagine focalizzano l'attenzione sugli aspetti prestazionali impiegando tecniche di IA più consolidate, tra cui il *Generative Design* (GD) e la *Topology Optimization* (TO), che negli ultimi anni hanno visto la proliferazione di sistemi di supporto alle decisioni spaziali (SDSS) sia da parte di case

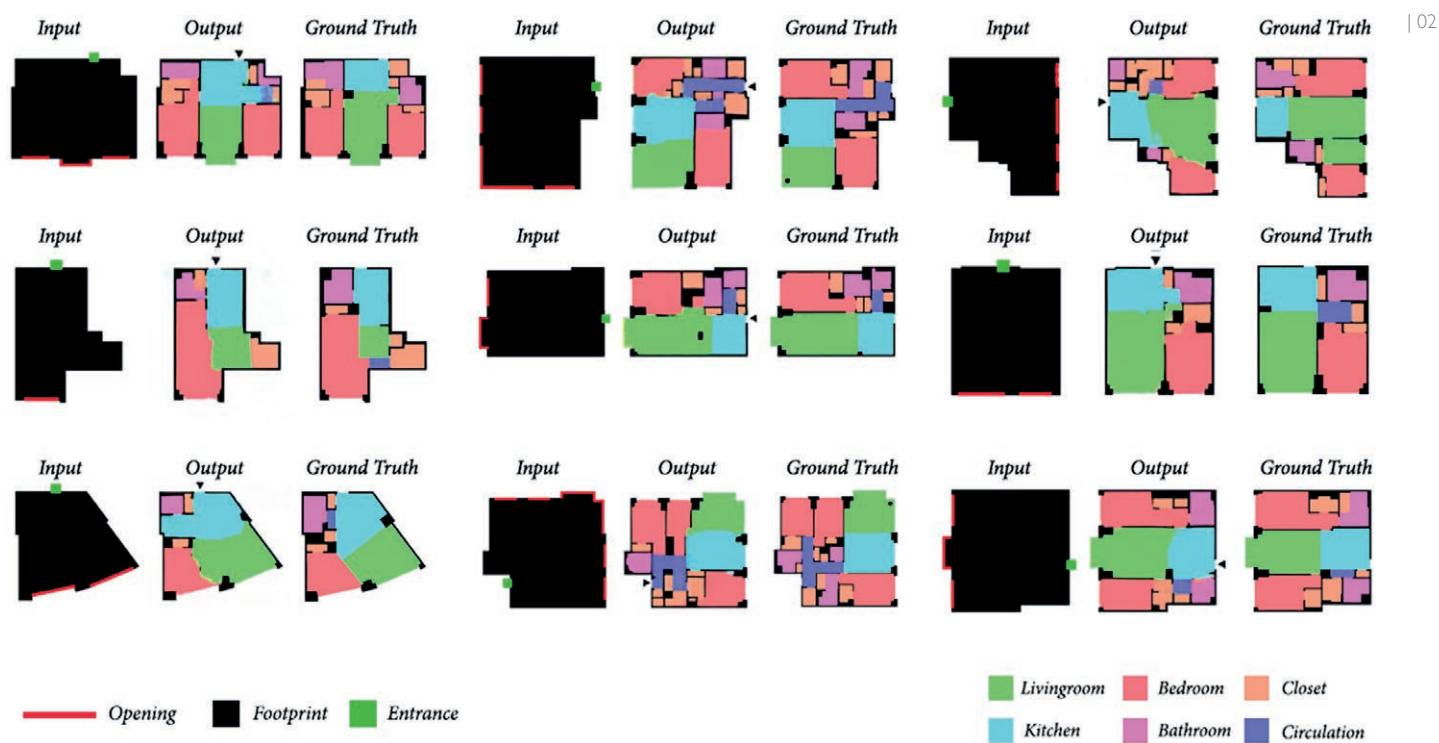
"automatic" mechanism ("that moves by itself"), which performs operations that generate results based on specific inputs, and an "autonomous" system (literally "that has its own laws") which, as in the case of AI, processes data and generates results without the direct intervention of the designer (Bernstein, 2022). However, these systems can only operate independently within rigid and circumscribed domains to achieve specific goals. Today we deal with a narrow artificial intelligence ("Weak AI"), whose autonomy is very far from what Kant, in the *"Critique of practical reason"*, defines as the "capacity of the will of a rational being", which is, instead, the result of a strong intelligence ("General AI") that must possess consciousness (Damasio, 2022) and understand the causality between events (Pearl and Mackenzie, 2018).

### Some tangible results

In academic research, the experimentation of new AI techniques and their potential for the construction sector is in turmoil. Regarding the design phase, it is possible to refer to two main strategies (Leach, 2021).

The first strategy involves the application of methods known as Generative Adversarial Networks (Goodfellow *et al.*, 2014), with which a computer is able to autonomously generate new images starting from 'self-learned' processing of the data given to it as input (images, graphs, numbers, etc.). These methods have been tested in the production of images (*machine hallucinations*) related to semi-photorealistic portions of buildings (Fig. 1) and two-dimensional floor plans (Fig. 2). However, rather than emphasising a visual or formal aspect of the architectural representation, consistently

- 02 | Planimetrie in cui l'organizzazione spaziale è stata generata dal modello GAN Pix2Pix, a partire da alcuni vincoli contestuali quali il perimetro dell'alloggio e la posizione dell'ingresso e delle aperture, metodo e immagine di © Stanislas Chaillou  
 Floor plans in which the spatial organization is generated by the GAN Pix2Pix model, starting from some contextual constraints such as the perimeter of the accommodation and the position of the entrance and openings, method and image by © Stanislas Chaillou



produttrici di *software* (Fig. 3), sia degli studi di Architettura che sviluppano i propri strumenti *in-house*.

A questa seconda categoria fanno capo gli algoritmi che generano automaticamente (entro alcuni vincoli fissati dal progettista) una serie di alternative progettuali e le classificano in base alla rispondenza agli obiettivi esplicitati a monte del processo. Questo metodo può diventare ancora più performante se associato a tecniche di apprendimento automatico, poiché in grado di auto-migliorarsi ‘allenandosi’ attraverso la generazione di innumerevoli alternative progettuali (Fig. 4).

Se la ricerca teorica ha prodotto oggi numerosi risultati, gli esempi ‘tangibili’ restringono di molto il campo di indagine e coinvolgono soprattutto le discipline ingegneristiche dove metodi e tecniche di ottimizzazione sono più consolidati anche nella prassi. Una recente realizzazione che è possibile considerare, è il complesso polifunzionale “Valley” ad Amsterdam, progettato dallo studio MVRDV insieme ad ARUP<sup>7</sup>. In questo caso, in fase di definizione del progetto, è stato implementato uno strumento computazionale di valutazione multiparametrica per verificare il soddisfacimento simultaneo di diversi obiettivi di progetto,

quali la privacy, la qualità delle visuali verso l'esterno e la massimizzazione della luce diurna, consentendo di ridurre i tempi di verifica di conformità degli appartamenti alla normativa nazionale (Fig. 5). In questo caso il GD è stato utilizzato per confrontare la soluzione finale (esito delle correzioni ‘manuali’ apportate sulla base della valutazione multiparametrica) con altre variazioni simili generate autonomamente dal computer (Christodoulou *et al.*, 2018).

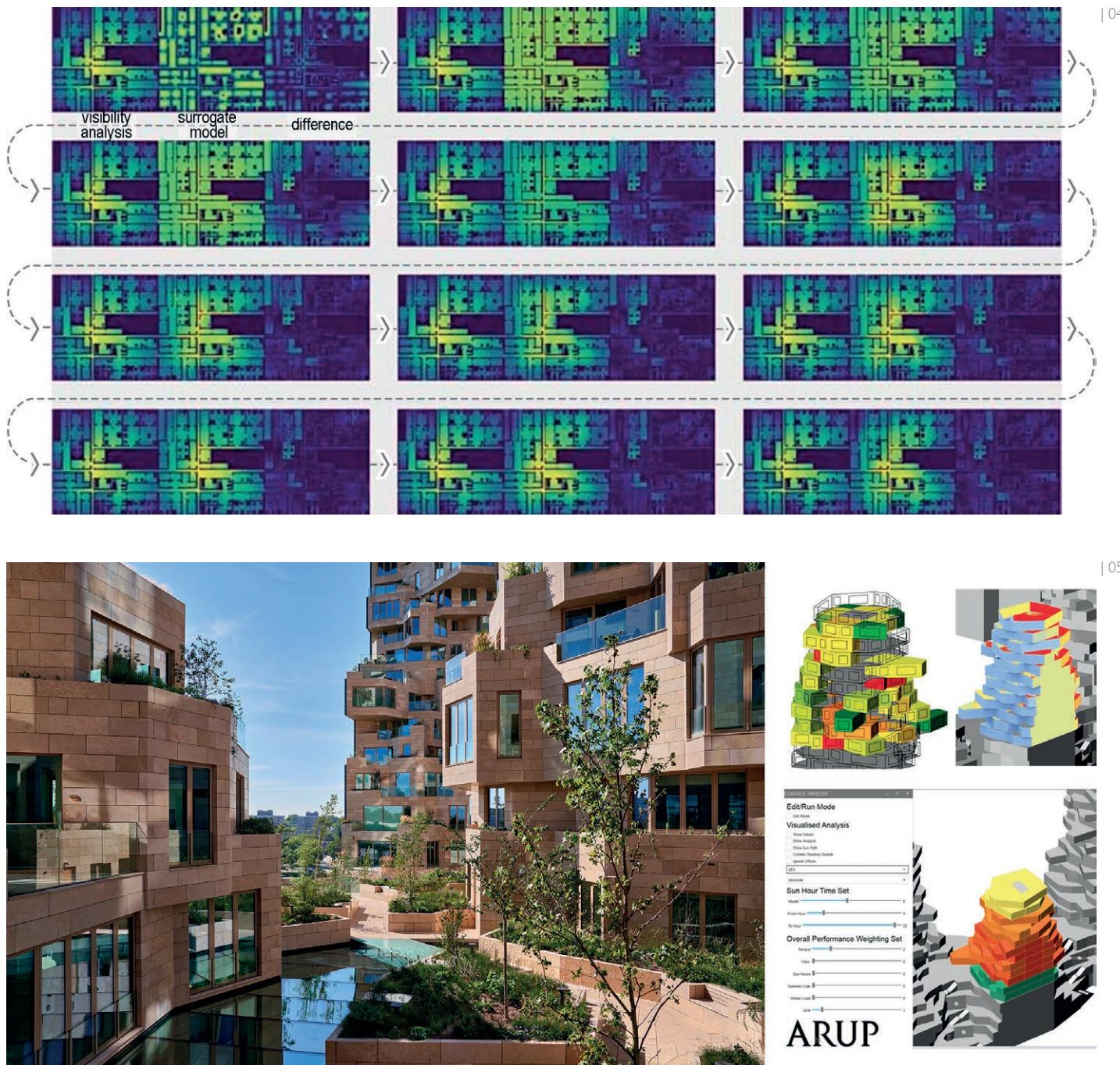
Nel caso del complesso “Elements”, in costruzione, al computer è stata affidata la definizione della sagoma della torre residenziale, attraverso la selezione, mediante un’ottimizzazione multiparametrica, dell’alternativa più performante (dal punto di vista dell’illuminazione e degli apporti termici) tra quelle generate automaticamente (Debney *et al.*, 2021).

Un terzo caso esemplificativo è quello del Feyenoord Stadium di Rotterdam progettato da OMA<sup>8</sup>, dove i progettisti si sono avvalsi del GD per esplorare e ottimizzare le scelte relative ai moduli della facciata e alla disposizione delle sedute all’interno dello stadio al fine di aumentarne il numero garantendo una visuale ottimale a tutti gli spettatori (Fig. 6).



04| Processo di apprendimento (immagini centrali) per imitare l'analisi di visibilità di una planimetria (immagini a sinistra). A destra, in colori chiari, la differenza tra i due diminuisce all'aumentare dell'accuratezza delle previsioni del modello, fonte: [www.fosterandpartners.com/plus/towards-artificial-intelligence-in-architecture/](http://www.fosterandpartners.com/plus/towards-artificial-intelligence-in-architecture/), © Foster+Partner  
*Learning process (central images) to imitate the visibility analysis of a floor plan (left images). On the right, with light colours, the difference between the two, which decreases as the accuracy of the model predictions increases, source: [www.fosterandpartners.com/plus/towards-artificial-intelligence-in-architecture/](http://www.fosterandpartners.com/plus/towards-artificial-intelligence-in-architecture/), © Foster+Partner*

05| A sinistra, complesso Valley ad Amsterdam, foto di Marcel Steinbach ©; a destra, visualizzazioni dello strumento di analisi multiparametrica, © ARUP  
*Left image, Valley complex in Amsterdam, photo by © Marcel Steinbach; right image, visualizations of the parametric design assessment tool, © ARUP*

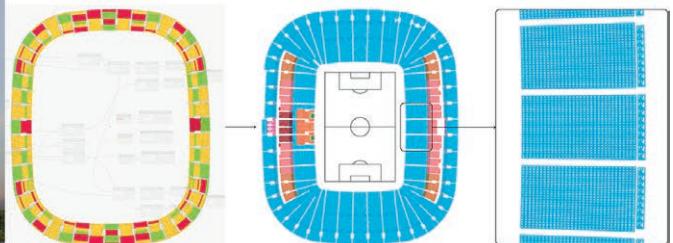


with the technological approach to the project, based on the culture of implementation, it is appropriate to question AI's benefits for greater control over the feasibility of the project in order to increase its quality (and, consequently,

the intervention quality), to work not only in a physical context but also in a historical, cultural and social one, and to enhance building performance (functional, energetic, structural, etc.). In line with this direction, the strate-

gies of the second area of investigation focus on performance aspects through more consolidated AI techniques, including Generative Design (GD) and Topology Optimisation (TO). In recent years, these methods have led to

a proliferation of spatial decision support systems (SDSS) by software manufacturers (Fig. 3) and architecture firms that develop their tools in-house. This second category includes algorithms that automatically generate



Negli esempi menzionati, è stato adottato un approccio analitico ‘avanzato’, che ha guidato le scelte del *team* di progettazione nella risoluzione di specifici problemi progettuali. Fondamentale è stata la fase di impostazione del problema (*problem setting/problem framing*), in cui sono stati ‘manualmente’ implementati gli *input*, definiti i vincoli e gli specifici obiettivi, rendendo la rispondenza degli *output* misurabile attraverso l’elucidazione dei requisiti in indicatori computabili. Una modalità che ha permesso di conseguire risultati difficilmente ottenibili attraverso un processo tradizionale, privo dell’uso della computazione, ma chiaramente verificabili (e affidabili).

Nei processi progettuali esaminati è possibile notare ampi ‘vuoti’ di interregno tra *output* e *input* che separano i molteplici passaggi (che non avvengono secondo un processo sequenziale, lineare) in cui è richiesto l’intervento dell’attività creativa, induttiva e critica dell’intelligenza umana.

Una serie di azioni di interpretazione semantica che non possono essere rese conoscenza esplicita (*explicit knowledge*), tra-

sferibile alla macchina. Di conseguenza, l’effettivo governo del processo progettuale deve spettare (e spetterà) sempre e solo a colui che saprà ‘porsi’ il problema e saprà impostare e gestire i relativi sotto-problemi secondo logiche di gerarchizzazione, comprendendo gli effetti di causalità tra le parti, esprimendo giudizi di qualità sugli *output* suggeriti dall’IA che eccedono ciò per cui è stata programmata.

Se nel prossimo futuro «le macchine impareranno da sole le relazioni dei set di informazioni eterogenee che compongono i progetti creando una costellazione interoperabile di dati» (Bernstein, 2022) e le applicazioni, oggi disconnesse, convergeranno in un unico sistema integrato per la gestione dell’intero ciclo di vita dell’edificio (ECPT, 2018) occorrerà ragionare sul fatto che tale processo si baserà, comunque, su una ‘modellazione’ del problema reale e su una sua (necessaria) semplificazione.

La decisione ottimale sarà quindi raramente ‘ottimale’ doverdo, di fatto, la formalizzazione trascurare aspetti essenziali

(within certain constraints set by the designer) a series of design alternatives, and classifies them according to compliance with the objectives stated at the beginning of the process. Combined with machine learning techniques, this method can become even more performant due to the machine’s self-improving and self-training abilities through the generation of innumerable design alternatives (Fig. 4). Theoretical research has now produced numerous results on the potential of such approaches. However, tangible examples dramatically shrink the field of investigation and mainly involve engineering disciplines where optimisation methods and techniques are more established in practice. A possible example is the multi-functional complex “Valley” in Amsterdam, recently implemented and designed by the firm MVRDV in col-

laboration with ARUP<sup>7</sup>. In this case, during the design definition phase, a multi-parametric evaluation tool was implemented to verify the simultaneous fulfilment of several design objectives, such as the privacy of residential spaces, the quality of the views, and the maximisation of daylight, allowing to reduce the time to verify the apartments’ compliance with national legislation (Fig. 5). In this case, the GD approach was used to compare the final solution (the result of the corrections ‘manually’ implemented by the designers based on the multi-parametric evaluation) with other similar variations generated by the computer (Christodoulou *et al.*, 2018).

For the complex under construction called “Elements”, the computer was required to define the residential tower’s shape, through the selection, based on a multi-parameter optimisation al-

gorithm, of the most performing alternative (from a lighting and heat inputs perspective) among those generated automatically (Debney *et al.*, 2021).

A third example is the Feyenoord Stadium in Rotterdam, designed by OMA<sup>8</sup>. In this case, the designers used GD techniques to explore and optimise the design choices related to the façade modules and to increase the number of seats, allowing for an optimal view for all spectators (Fig. 6).

The mentioned examples adopted an advanced analytical approach, which guided the design team’s choices in solving specific design problems. The problem formulation (or problem framing/setting) phase was crucial in defining inputs, constraints, and goals. This activity was manually implemented by designers, making the compliance of the outputs measurable through the explicitness of the require-

ments in computable indicators. Such a method has made it possible to achieve results that are prohibitive for a traditional process, without the use of the computer, but which are clearly verifiable (and reliable).

In the design processes examined, significant ‘interregnū’ gaps between outputs and inputs separate the multiple steps, which do not follow a sequential and linear process. Such gaps require creative, inductive, and critical human intelligence intervention. It demands a semantic interpretation that cannot be made into explicit and transferable knowledge to the machine.

Consequently, the effective government of the design process must (and will) always be up to the one who can pose the problem and manage its sub-problems according to a hierarchical rationale, understanding the effects of

delle situazioni concrete e, ancor peggio, postulare variabili e parametri che non possono essere misurati (Simon, 1996).

### Futuri scenari auspicati

Se progettare significa operare scelte consapevoli all'interno di un sistema dinamico adattivo, attuando un processo iterativo di informazione-decisione (Ciribini, 1984), è di fondamentale importanza la capacità di selezionare (in più momenti del progetto) le informazioni rilevanti, sulla base delle quali strutturare la logica operativa ad esso sottesa. Questa continua attività di *problem-setting* (attuata dall'uomo) e *problem-solving* (supportata dall'IA) deve confrontarsi con l'indeterminatezza del progetto di Architettura, strettamente connesso a fattori contestuali specifici e mutevoli, che richiedono l'interpretazione di una complessità non standardizzabile. In tale ambito, le variabili in gioco non sono sempre definibili, pertanto, l'esito non può essere solo frutto di un calcolo di ottimizzazione, o di un processo deduttivo. Progettare, invece, richiede sensibilità, capacità di ragionamento critico e abilità cognitive non emulabili dall'IA. Intuizione, invenzione, adattabilità e gestione degli imprevisti, sono capacità che concorrono all'effettiva efficacia delle scelte di progetto. Il distacco che ancora intercorre tra la teoria e l'effettiva applicazione pratica dei sistemi di IA nel progetto di Architettura rende opportuno distinguere quelle che potrebbero essere le ripercussioni a lungo termine da quelle che sono, invece, le sfide attuali (o imminenti) verso le quali indirizzare gli sforzi, per beneficiare di un'intelligenza "aumentata" o "estesa" (Leach, 2021), in grado di potenziare l'intelligenza dell'essere umano, permettendo di conseguire risultati che senza il computer non si potrebbero ottenere.

causality between the events and expressing quality judgments on the outputs suggested by AI that exceed what it was programmed for.

If, in the near future, «machines will learn by themselves the relationships of the heterogeneous information sets that make up the projects by creating an interoperable constellation of data» (Bernstein, 2022) and the applications, now disconnected, will converge in a single integrated system for the management of the entire life cycle of the building (ECPT, 2018), it will be necessary to consider that such a process will, however, be based on a 'modelling' of the real problem and its (necessary) simplification.

Therefore, the "optimal decision" will rarely be "optimal" because - in fact - formalisation must neglect essential aspects of concrete situations and, even worse, postulate variables and

parameters that cannot be measured (Simon, 1996).

### Desired future scenarios

Agreeing that design means making conscious choices within an adaptive dynamic system by implementing an iterative information-decision process (Ciribini, 1984), it is essential to be capable of selecting the relevant information at different phases based on which to structure the operating rationale underlying it.

This continuous problem-setting (implemented by humans) and problem-solving (supported by AI) activity faces the indeterminacy of the Architectural project, which is closely related to specific and changing contextual factors that require the interpretation of non-standardisable complexity. In this context, the variables involved are not always definable. Therefore, the out-

Questo si traduce con l'esigenza di identificare dei principi su cui impostare i processi di sviluppo della pratica della progettazione, individuando allo stesso tempo le modalità con cui strutturare le conoscenze per poterle trasferire in ambito digitale (Russo Ermolli, 2020).

In conclusione, si ritiene che per guidare, indirizzare, accompagnare una transizione 'indolore' verso l'uso sempre più diffuso dell'IA bisognerà assumere un atteggiamento attivo e propositivo affinché i nuovi strumenti di prefigurazione, simulazione e rilevazione dell'errore vengano sviluppati in modo coerente, trasparente, controllabile e flessibile ad accogliere l'intervento intuitivo, ideativo e induttivo dell'uomo.

I casi esemplificativi sopra esposti (sebbene non esaustivi di questa complessa realtà in evoluzione) ci inducono a riflettere su come l'IA possa essere utilizzata in modo anche 'creativo' e ricondotta all'interno di un processo in cui chi progetta governa le logiche sottese alla risoluzione dei problemi.

Conseguentemente, andranno allora potenziate tutte quelle *soft skills*, proprie del pensiero critico, che permetteranno di essere resilienti verso i sempre più frequenti cambiamenti che interesseranno la pratica progettuale, aggiornando anche l'attività formativa «per consentire un pieno sviluppo delle potenzialità offerte dal nuovo *milieu* tecnologico, per evitare al contempo l'affermarsi di forme di assoggettamento acritico alla tecnica» (Campioli, 2020). Quello che si auspica vada a delinearsi è dunque uno scenario che vede rafforzata la posizione del progettista come protagonista/regista dell'attività decisionale, in un contesto caratterizzato da un crescente impiego di un'IA *human-centric*, 'aperta' e al servizio dell'intervento abduttivo dell'uomo e del suo benessere, coerente con il modello di Industria 5.0.

come cannot be only the result of an optimisation calculation or a deductive process.

On the other hand, designing requires sensitivity, critical reasoning skills and cognitive abilities that cannot be emulated by AI. Intuition, invention, adaptability, and management of unforeseen events contribute to the effectiveness of design choices.

The existing gap between theory and actual practical application of AI systems in architectural design makes it appropriate to distinguish what may be the long-term repercussions from the current (or imminent) challenges towards which to address efforts. The goal is to benefit from an "increased" or "extended" intelligence (Leach, 2021), capable of enhancing the natural intelligence of the human being, allowing us to achieve results that we could not obtain without the computer.

This purpose means identifying principles on which to base the development processes of design practice, while structuring the knowledge to transfer them into the digital environment (Russo Ermolli, 2020).

In conclusion, it is believed that to guide, direct and accompany a 'painless' transition towards an increasingly widespread use of AI, it will be necessary to adopt an active and proactive attitude so that the new tools for prefiguration, simulation and error detection are developed in a coherent, transparent, controllable and flexible manner to accommodate the intuitive, conceptual and inductive intervention of humans.

The illustrative cases described above (although not exhaustive of this complex and evolving reality) lead us to reflect on how AI can also be used in a 'creative' way and brought back to a

Un rinnovato *modus operandi* teso, quindi, non tanto a contrarre il tempo dedicato alla fase progettuale, o ad ottenere un risultato puramente estetico o formale, quanto invece teso a beneficiare della possibilità di governo, verifica e valutazione simultanea di molteplici parametri di progetto, per un maggiore livello di qualità processuale, progettuale e realizzativa degli interventi.

#### ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Si ringraziano Alex Mortiboys e Giuseppe Dotto per le informazioni relative al processo progettuale attuato per il Feyenoord Stadium di Rotterdam dallo studio OMA.

Si ringrazia inoltre Alex Christodoulou dello studio ARUP per le informazioni relative alla progettazione generativa adottata per i progetti "Valley" ed "Elements" ad Amsterdam.

#### NOTE

<sup>1</sup> Cfr. Aristotele, *Metafisica*, Libro I.

<sup>2</sup> La locuzione "intelligenza artificiale" è stata ufficializzata nel 1956 e attribuita a John McCarthy. Tuttavia, il dibattito circa la possibilità di affidare ad una macchina abilità dell'essere umano ha origini ben precedenti (Buchanan, 2006).

<sup>3</sup> Formalmente, la transizione digitale del settore delle costruzioni in Europa è iniziata con l'adozione della Direttiva 2014/24/UE che promuove l'uso del BIM per la realizzazione di opere pubbliche.

<sup>4</sup> In tale direzione, l'iniziativa del New European Bauhaus intende promuovere, in coerenza con il Green Deal, la riqualificazione degli ambienti di vita, avvalendosi anche dei benefici della digitalizzazione del settore delle costruzioni, tra cui l'applicazione dei sistemi di IA.

<sup>5</sup> In Europa, la "Risoluzione del Parlamento europeo recante raccomanda-

process in which it is the designer who governs the rationale underlying the resolution of problems.

Consequently, all soft skills typical of critical thinking, which will enable us to be resilient towards increasingly frequent changes that will affect design practice, will need to be strengthened. Even education will have to be updated «to allow the full development of the potentialities offered by the new *technological milieu*, avoiding at the same time the affirmation of forms of uncritical subjection to the technique» (Campioli, 2020).

The hope is a scenario that strengthens the designer's position as a protagonist/director of decision-making in a context characterised by increasing use of human-centric AI, open and at the service of the abductive reasoning and well-being of humans, consistently with the model of Industry 5.0.

A renewed *modus operandi* aimed, therefore, not at reducing the time dedicated to the design phase or at obtaining a purely aesthetic or formal result but rather at benefitting from the possibility of simultaneous governance, verification and evaluation of multiple design parameters for a higher level of procedural, design and implementation quality of interventions.

#### ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

We wish to thank Alex Mortiboys and Giuseppe Dotto for the information on the design process implemented for the Feyenoord Stadium in Rotterdam by OMA.

We also thank Alex Christodoulou of the ARUP study for the information regarding the generative design adopted for the "Valley" and "Elements" projects in Amsterdam.

zioni alla Commissione su un regime di responsabilità civile per l'intelligenza artificiale, 2020/2014(INL)" non conferisce personalità giuridica ai sistemi di IA, ma, a seconda del rischio ad essi associato, considera responsabili le persone coinvolte nella catena del valore.

<sup>6</sup> La prima *Conference on Design Methods* si è tenuta a Londra nel 1962 e ha sancito l'avvio della ricerca che mira ad esplicitare e sistematizzare i metodi di progettazione nell'architettura, nell'ingegneria, nel design industriale, e nelle comunicazioni.

<sup>7</sup> <https://www.arup.com/projects/valley> (accessed 24 August 2022).

<sup>8</sup> <https://www.autodesk.com/customer-stories/oma> (accessed 24 August 2022).

#### REFERENCES

- Bernstein, P. (2022), *Machine Learning: Architecture in the age of Artificial Intelligence*, RIBA Publishing, London.
- Buchanan, B.G. (2006), "A (Very) Brief History of Artificial Intelligence", *AI Magazine*, Vol. 26, n.4.
- Campioli, A. (2020), "Tecnologie e cultura del progetto nella società delle mangrovie", in Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S. and Tucci, F. (Eds.), *Il Progetto nell'Era Digitale. Tecnologia Natura Cultura*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 68-70.
- Castells, M. (1996), *The Rise of the Network Society, The Information Age: Economy, Society and Culture*, Vol. I., Blackwell Publishers, Cambridge.
- Christodoulou, A., Vola, M. and Rikken, G. (2018), "Case Study for the Application of Multidisciplinary Computational Design Assessment and Constructability Optimisation Tools", *SimAUD '18, Delft, June 4-7, 2018*, Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, pp. 1-8.
- Ciribini, G. (1984), *Tecnologia e progetto: Argomenti di cultura tecnologica della progettazione*, CELID, Torino.
- Crawford, K. (2021), *Atlas of Ai: Power, Politics, and the Planetary Costs of Artificial Intelligence*, Yale University Press, New Haven.

#### NOTES

<sup>1</sup> See Aristotle, *Metaphysics*, Book I.

<sup>2</sup> The term "artificial intelligence" was officially formalised in 1956 and attributed to John McCarthy. However, the debate about the possibility of assigning human tasks to a machine has much earlier origins (Buchanan, 2006).

<sup>3</sup> Formally, the digital transition of the European construction sector began with the Directive 2014/24/EU, which promotes the use of BIM for the creation of public works.

<sup>4</sup> In this regard, in line with the Green Deal, the New European Bauhaus initiative aims to promote the renovation of living environments, also making use of the benefits of the digitisation process of the construction sector, including the application of AI systems.

<sup>5</sup> In Europe, the "European Parliament resolution with recommenda-

tions to the Commission on a civil liability regime for artificial intelligence, 2020/2014(INL)" does not confer legal personality to AI systems but, depending on the risk associated with them, holds the people involved in the value chain accountable.

<sup>6</sup> The first Conference on Design Methods was held in London in 1962 and marked the start of research aimed at systematising design methods in architecture, engineering, industrial design, and communications.

<sup>7</sup> <https://www.arup.com/projects/valley> (accessed 24 August 2022).

<sup>8</sup> <https://www.autodesk.com/customer-stories/oma> (accessed 24 August 2022).

- Cross, N. (1999), "Natural Intelligence in Design", *Design Studies*, Vol. 20, n.1, pp. 25-39.
- Damasio, A. (2022), *Sentire e conoscere. Storia delle menti coscienti*, 2nd ed., Adelphi, Milano.
- Debney, P. et al. (2022), "Advanced Applications in Computational Design", in: Bolpagni, M., Gavina, R. and Ribeiro, D. (Eds.), *Industry 4.0 for the Built Environment. Structural Integrity*, Vol. 20, Springer, Cham, pp. 77-102.
- European Construction Sector Observatory (ECSO) (2021), Digitalisation in the construction sector.
- European Commission (2020), *European enterprise survey on the use of technologies based on artificial intelligence: final report*, Publications Office, available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2759/759368> (accessed 24 August 2022).
- European Construction Technology Platform (ECPT) (2018), Artificial Intelligence – Research and Innovation Needs Manufacturing, Energy Intensive Industries, Bio-Based Industries and Construction – Focus on the Construction and Built Environment Sector.
- Ferrante, T. (2020), "Technological design and social innovation", in Lauria, M., Mussinelli, E., Tucci, F. (Eds.), *Producing Project*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 368-373.
- Goodfellow, I. et al. (2014), "Generative Adversarial Nets", *Proceedings of the International Conference on Neural Information Processing Systems, NIPS 2014*, pp. 2672-2680.
- Kelly, N., and Gero, J. (2021), "Design thinking and computational thinking: A dual process model for addressing design problems", *Design Science*, Cambridge University Press, Vol. 7, p. 8.
- Kurzweil, R. (2006), *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*, Penguin Books, London.
- Leach, N. (2021), *Architecture in the Age of Artificial Intelligence*, Bloomsbury Publishing, London.
- Pearl, J., and Mackenzie, D. (2018), *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*, Basic Books, New York.
- Rittel, H.W., and Webber, M.M. (1973), "Dilemmas in a general theory of planning", *Policy Sciences*, Vol. 4, n.2, pp. 155-169.
- Russo Ermolli, S. (2020), *The digital culture of architecture. Note sul cambiamento cognitivo e tecnico tra continuità e rottura-Notes on cognitive and technical change between continuity and disruption*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.
- Simon, H.A. (1996), *The Sciences of the Artificial*, 3rd ed., MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Tegmark, M. (2018), *Life 3.0: Being Human in the Age of Artificial Intelligence*, Penguin Books, London.
- Wing, J. (2006), "Computational thinking", *Communications of the ACM*, vol. 49, n. 3, pp. 33-35.

Alessandra Barresi, <https://orcid.org/0000-0002-1208-0445>

Dipartimento di Architettura e Territorio, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Italia

[alessandra.barresi@unirc.it](mailto:alessandra.barresi@unirc.it)

**Abstract.** Le città, oggi, sono chiamate ad assumere visioni e prospettive di lungo periodo, rispondendo con competenza e capacità programmatica e soluzioni pertinenti alla spinta verso gli ambiziosi obiettivi previsti dagli imponenti investimenti che riguardano il Paese. La tecnologia costituisce sicuramente uno degli strumenti più importanti per il raggiungimento di tali obiettivi. L'innovazione digitale, attraverso la conoscenza dei dati e la capacità di analizzarli ed elaborarli anche in chiave predittiva, rappresenta uno strumento fondamentale per affrontare le sfide urbane più impegnative del nostro tempo. L'approccio metodologico proposto è quello dell'*Urban Digital Twin* applicato alla città come modello predittivo per immaginare lo sviluppo della città stessa nei termini della sostenibilità.

**Parole chiave:** Smart City; Sostenibilità; Tecnologie; Big Data; Urban Digital Twin.

## Introduzione

«Oggi ha sempre meno senso distinguere il reale dal virtuale, potendo, al più far riferimento a due dimensioni della stessa realtà che si compenetrano: una fisica e l'altra digitale e che si ridefiniscono dinamicamente in una relazione che vede l'essere umano al centro di un complesso percorso di cambiamento» (Epifani, 2020). La nuova realtà, costituita dunque da due dimensioni intrinsecamente relazionate tra loro, necessita di un approccio innovativo alla pianificazione urbanistica realizzabile attraverso le potenzialità dell'*Urban Digital Twin*. Da tale consapevolezza discende l'interesse per questo modello digitale urbano tridimensionale con particolare riferimento al *Digital Twin* realizzato per la città di Zurigo, unico caso europeo attualmente attivo applicato ai piani urbanistici, di cui vengono illustrate tutte le specificità e le capacità che gli consentono di potersi interfacciare con la realtà in evoluzione. Le conclusioni, invece, offrono alcuni spunti di riflessione sull'altra faccia della medaglia, ovvero le criticità che possono emergere dall'uso di tale modello tridimensionale digitale.

## Urban Digital Twin and urban planning for sustainable cities

**Abstract.** Cities nowadays need to have long-term visions and perspectives to achieve the ambitious targets for which vast investments are being made. They need to act with competence and capability-based planning, and to come up with suitable solutions. Technology is unquestionably a factor of crucial importance when aiming for these targets. Digital innovation, based on data knowledge, analysis and projection, is crucial to tackle the most demanding challenges of our times. The methodological approach proposed here is an Urban Digital Twin applied to cities as a predictive model to obtain a projection of their development in terms of sustainability.

**Keywords:** Smart City; Sustainability; Technology; Big Data; Urban Digital Twin.

## Sfide della città contemporanea, smart cities e innovazione tecnologica

Gli enti istituzionali oggi preposti alla ripartenza dello sviluppo sono le città, *compatte, vivibili e resilienti* (Hidalgo and Belliard 2020). Queste non costituiscono soltanto i poli dello sviluppo, i luoghi delle interazioni e delle opportunità, ma rappresentano anche i luoghi in cui si concentrano le forti contraddizioni del vivere sociale. La necessità di dover affrontare le sfide che derivano da tali contraddizioni ha attirato da sempre l'attenzione dell'Unione Europa e nel 2016, è stata approvata, da parte degli Stati Membri dell'Unione, un'Agenda Urbana Europea per promuovere investimenti sostenibili, intelligenti ed inclusivi in modo da rafforzare il ruolo delle città nell'affrontare le sfide urbane più complesse (Risoluzione Parlamento Europeo, 2011).

Certamente il progresso tecnologico, con in primo piano la trasformazione digitale, costituisce un importante strumento in mano a chi governa la città e ne progetta il suo futuro sviluppo nell'ottica della sostenibilità per far sì che la città stessa acquisisca tutte quelle peculiarità che le consentano di trasformarsi in una smart city, concetto al quale ancora oggi corrispondono tante definizioni, tra le quali quella, condivisa anche da Batty (2012), secondo cui: «Una smart city è una sintesi di infrastrutture hard (o capitale fisico) con la disponibilità e la qualità della comunicazione della conoscenza e delle infrastrutture sociali» (Caragliu *et al.*, 2009).

Il mondo è oggi per lo più dominato da flussi di informazioni che non lasciano tracce fisiche come nel passato. L'acquisizione, il coordinamento, la comunicazione, l'accoppiamento e l'integrazione dei dati derivanti dal flusso di informazioni possono avvenire solo

## Introduction

«Distinguishing reality from virtual reality is becoming increasingly meaningless nowadays, as we can, at most, refer to two dimensions of the same reality permeating into each other. One is physical, the other is digital, and they are dynamically redefined in a context where mankind is seen at the centre of a complex transformational process» (Epifani, 2020). Hence, the new reality made up of two intrinsically interconnected dimensions needs an innovative approach to city planning that is feasible thanks to the potential of the Urban Digital Twin. Such awareness has led to the interest in this three-dimensional, urban, digital model, specifically looking at the Digital Twin model developed for Zurich. The latter is currently the only case in Europe where the model is actively applied to urban plans, with all its specific fea-

tures and capabilities enabling it to connect with the evolving reality. Our conclusions, instead, offer some food for thought with regard to the other side of the coin, that is to say, the new, critical aspects, which may stem from the adoption of this three-dimensional, digital model.

## Challenges for contemporary cities, smart cities and technological innovation

The institutions charged with revamping development are the cities themselves, which are *compact, livable and resilient* (Hidalgo and Belliard 2020). Cities are not only crucial sites for development, interaction and opportunities. They are also where society's strong contradictions are concentrated. The necessity to face the challenges created by these contradictions has been acknowledged by the European

grazie alle ICT che consentono di trasformare la città in una smart city sostenibile, in cui la connessione delle infrastrutture e dei servizi permette alla città di funzionare in modo più efficiente.

Già nel 2012 il programma *Future ICT* condotto da un gruppo multidisciplinare di ricercatori e i cui risultati sono sintetizzati nell'articolo "Smart Cities of the future" (Batty *et al.*, 2012) auspica la costruzione di un sistema olistico completamente nuovo per l'acquisizione integrata dei dati, del querying e del mining. La sfida di *Future ICT* è costruire modelli che siano alle prese con i cambiamenti continui che caratterizzano oggi la città e che abbiano il potenziale per poter abbracciare concezioni anche molto diverse tra loro di come la città potrebbe funzionare.

I risultati ottenuti attraverso il programma *Future ICT* si inseriscono in un quadro generale di trasformazione digitale che nell'ultimo decennio, grazie alla diffusione dell'IoT, del Sistema Cyber-Fisico, delle Tecnologie della Comunicazione, ha sempre più spostato gli interessi della scienza verso la costruzione di un sistema che consenta di trasferire informazioni tra fonti diverse, di cui il *Digital Twin* (DT) è oggi diventato uno dei concetti più promettenti.

#### **Smart city e Urban Digital Twin nel dibattito culturale e scientifico**

il suo comportamento reale. I dati del sistema fisico sono rappresentati dalle informazioni digitali provenienti dal sistema virtuale che è connesso a un sistema reale durante l'intero processo del ciclo di vita (Batty, 2018). Pertanto l'integrazione del digitale con i suoi gemelli fisici crea un modo efficace per gesti-

In questo fertile contesto scientifico si inquadra il *Digital Twin* (DT) come controparte digitale di un certo prodotto che simula

Union. This interest led to the EU Member States' approval, in 2016, of an Urban Agenda for the EU. This agenda should promote sustainable, intelligent and inclusive investments, so as to strengthen the role of cities when facing the most complex urban challenges (EP Resolution, 2011).

Technological progress, and more specifically digital transformation, is certainly an important tool available to those who manage a city and plan its future sustainable development. The aim is to endow a city with all the features needed to make it a smart city. This concept has been expressed in various definitions, one of which, also shared by Batty (2012) states that "A Smart City is a synthesis of hard infrastructure (or physical capital) with the availability and quality of knowledge communication and social infrastructures" (Caragliu *et al.*, 2009).

The world is now mostly dominated by information flows leaving no physical trace, as was the case in the past. Acquisition, coordination, communication, coupling and integration of data from an information flow can be carried out only thanks to ICTs, making cities smart and sustainable, where connections of infrastructures and services allow them to function more efficiently.

Back in 2012, the *Future ICT* project, led by a multidisciplinary group of researchers, the results of which are summed up in the article "Smart Cities of the future" (Batty *et al.*, 2012), expressed hope for a completely new holistic system for integrated data collection, querying and mining. The challenge for *Future ICT* is to build models able to cope with constantly evolving cities, and to embrace very different concepts on how cities might function.

re, regolare e migliorare il processo decisionale mentre il sistema reale è in funzione. Il DT presenta varie opportunità e può essere applicato in diversi campi, come quello della smart city, rispetto alla quale acquisisce il temine di *Urban Digital Twin*. Nel dettaglio, l'*Urban Digital Twin* rappresenta il modello vivente di un sistema fisico che si adatta continuamente ai cambiamenti operativi della città sulla base dei dati forniti in tempo reale da vari sensori IoT e prevede i comportamenti con l'aiuto dell'apprendimento automatico e dell'intelligenza artificiale (Kaur *et al.*, 2020). I dati raccolti vengono gestiti dal gemello digitale attraverso un processo tecnologico che si basa sulla integrazione dei modelli BIM e GIS (Giavino, 2021).

Un tipico modello di città 3D è derivato da varie tecniche di acquisizione, ad esempio fotogrammetria e scansione laser, estrusione da impronte 2D, radar ad apertura sintetica, modelli e disegni architettonici, dispositivi portatili, modellazione procedurale e geoinformazione (Biljecki *et al.*, 2016). Tale complessità di informazioni si affronta attraverso la modellazione collaborativa di GIS e BIM, che, prendendo le comunità come scala immediata, unifica i dati sia alla scala della città che del singolo edificio per essere da supporto ad una analisi completa della realtà urbana. L'integrazione tra BIM e GIS riesce così ad unire tanto i dati per il processo di costruzione quanto quelli per la gestione dell'ambiente urbano.

#### **Il Digital Twin di Zurigo tra le esperienze europee più significative**

Lo studio *Cities of the future* dello Smart City Index del 2021 rivela quali sono le città del mondo che impiegano maggiormente la tecnologia per migliorare la sostenibilità e la qua-

The results obtained through the *Future ICT* project are located within a general frame of digital transformation which, in the last decade, thanks to the spread of the Internet of Things (IoT), of the Cyber-Physical System and of ICTs, has increasingly shifted the interest of science towards the construction of a system able to share information with different sources. Among these, the *Digital Twin* (DT) is now one of the most promising concepts.

**Smart cities and Urban Digital Twin in the cultural and scientific debate**  
The Digital Twin (DT) participates in this fertile, scientific context as a digital counterpart of a certain item, simulating its actual behaviour. Data from the physical system are represented by the digital information generated by the virtual system, connected with a real system during the entire process

of a life cycle (Batty, 2018). Thus, the integration of a digital item with its physical twins creates an effective way of managing, adjusting and improving the decision process, while the real system is operating. The DT offers several possibilities and can be adopted in various fields, such as smart cities, being called, in this specific case, *Urban Digital Twin*.

More specifically, an *Urban Digital Twin* is the live model of a physical system, which constantly adapts to operational changes in a city, based on real time data provided by IoT sensors, and foresees behaviours, with the help of machine learning and artificial intelligence (Kaur *et al.*, 2020). Data collected is processed by the *Digital Twin* thanks to technology based on the integration of Building Information Modelling (BIM) and Geographic Information System (GIS) (Giavino, 2021).

lità della vita dei propri cittadini. Zurigo, Helsinki, Rotterdam, Singapore si caratterizzano per avere indirizzato le loro politiche di mitigazione e adattamento climatico attraverso la tecnologia innovativa del Digital Twin. Nonostante queste città condividano la stessa finalità generale nella scelta di ricorrere al Urban Digital Twin, ovvero quella di affrontare le criticità relative al cambiamento climatico, in ciascuna di esse il DT si caratterizza in modo diverso (D'Amanzo and Feijoo Rivas, 2020). Helsinki produce un modello di città 3D e lo utilizza come base per un'applicazione di mappe 3D chiamata *Helsinki Energy and Climate Atlas*, che contiene dati energetici reali e calcolati sul patrimonio edilizio cittadino. Ciò consente valutazioni specifiche degli edifici, analisi e simulazioni energetiche in tutta la città e l'identificazione di potenziali miglioramenti dell'efficienza energetica (SustainEurope, 2019). *Zurich City Digital Twin*, come si vedrà in seguito più dettagliatamente, si concentra sul tema dell'energia, attraverso l'analisi del potenziale solare, e sull'edilizia, attraverso la visualizzazione di progetti, il calcolo dei flussi d'aria, l'analisi dell'ombra e dello *sky view factor*. Per valutare i benefici e i costi di vari scenari di pianificazione, Singapore adotta un approccio integrato per costruire un *Digital Urban Climate Twin* (DUCT). Al fine di tenere conto della moltitudine di fattori coinvolti nella pianificazione di un ambiente costruito, il modello mira a integrare tutti i componenti rilevanti e sarà utilizzato per valutare soluzioni di progettazione urbana sensibili al clima su tutte le scale spaziali (City2city, 2020). Lo studio del *Digital Twin di Rotterdam* è centrale per riflettere sull'importanza del ruolo della morfologia urbana nella mitigazione del cambiamento climatico (Gemeente Rotterdam, 2021). Questa tipologia di *Digital Twin* utilizza il mo-

dello digitale per testare diversi scenari per la pianificazione futura, ad esempio per quanto riguarda i cambiamenti di densità e i loro effetti sul clima urbano, su traffico e sulla mobilità. Nel caso di Zurigo, come si è accennato, la costruzione dell'*Urban Digital Twin* è principalmente finalizzata ad incrementare il livello di sostenibilità della città, divenendo strumento per affrontare una serie di sfide urbane dovute all'incremento previsto per i prossimi anni del numero degli abitanti, della conseguente occupazione lavorativa, della densificazione urbana e della competizione negli usi del suolo. L'obiettivo del DT per la città di Zurigo è quello di realizzare una rappresentazione digitale della città per simulare possibili soluzioni a questioni da superare nell'ambito di una pianificazione urbana sostenibile. A tale scopo, i componenti del gemello digitale devono essere aggiornati con cadenze diverse e, se del caso, arricchiti con dati in tempo reale. Nel triangolo del mondo reale (fisico), sociale e digitale, il gemello digitale connette il mondo reale con il mondo digitale o, più precisamente, con il suo spazio. Il gemello digitale si apre così a nuove prospettive per l'urbanistica. Il DT della città di Zurigo arricchisce un precedente modello 3D della città (realizzato nel 2011) determinando un consistente incremento dell'inventario dei dati spaziali 3D e aggiunge, alla modellazione e alla descrizione dei dati, la gestione del ciclo di vita dei singoli componenti nonché l'intero inventario di dati. I principali dati spaziali 3D presenti nel DT di Zurigo, gestiti dall'operatore Geomatics +Surveying, sono relativi allo spazio pubblico, al catasto delle utenze (energia, rifiuti, acqua trasporti), alla modellazione delle facciate, ai ponti, alle linee di alta tensione e infine agli elementi storici della città. Per far sì che il DT possa essere conosciuto da tutti con la sua enorme portata

A typical 3D model of a city is obtained through various acquisition techniques, such as photogrammetry and laser scanning, 2D print extrusion, synthetic-aperture radar, architectural models and drawings, portable devices, procedural modelling and geoinformation (Biljecki *et al.*, 2016). This complex information is processed through collaborative modelling carried out by GIS and BIM which, taking communities as an immediate parameter, uniforms data both to the scale of a city and to that of a single building, so as to deliver a full analysis of an urban reality. The integration between BIM and GIS, therefore, successfully converges data concerning the building process with those regarding management of the urban environment.

#### Zurich's Digital Twin – one of the most remarkable experiences in Europe

The study *Cities of the future*, in the 2021 Smart City Index, gives a world list of cities that use technology widely to improve sustainability and the quality of life of their citizens. Zurich, Helsinki, Monaco, Rotterdam and Singapore have distinguished themselves for their policies of climate mitigation and adaptation, adopting Digital Twin innovative technology. Although these cities share the same general objectives, having chosen to use the Urban Digital Twin to deal with the crucial aspects deriving from climate change, in each of them the DT has a different connotation (D'Amanzo and Feijoo Rivas, 2020). Helsinki avails itself of a 3D model of the city and uses it as a base for a 3D-map application called *Helsinki Energy and Climate Atlas*, con-

taining real energy data, calculated on the existing city buildings. This makes it possible to obtain specific evaluations of buildings, analyses and energy simulations in the entire city, identifying potential improvements of energy efficiency (SustainEurope, 2019). The Zurich City Digital Twin, as we shall see below, is focused on energy, analysing the potential of solar energy and, regarding existing buildings, visualising plans, calculating air flows, analysing shade and the sky view factor. To evaluate costs and benefits of various planning options, Singapore uses an integrated approach to build a Digital Urban Climate Twin (DUCT). Aimed at taking into account the multitude of factors involved when planning in an already built environment, the model integrates all relevant components, and will be used to evaluate climate-sensitive, urban planning solutions on all space scales (City2city, 2020). The study of Rotterdam's Digital Twin is crucial when considering the importance of urban morphology to mitigate climate change (Gemeente Rotterdam, 2021). This type of Digital Twin adopts the digital model to test various scenarios for future planning with regard, for instance, to changes in density and their effect on urban climate, traffic, and mobility. In the case of Zurich, as mentioned above, the adoption of the Urban Digital Twin is aimed at improving the city's level of sustainability, working to deal with a range of urban challenges stemming from the predicted increase in the number of inhabitants for the coming years and, consequently, employment, urban densification, and competition with regard to the use of land. The objective of the DT regarding Zurich is to create a digital represen-

di dati a disposizione è stato necessario rendere il set di dati *Open Government Data*.

Come molte altre città, Zurigo utilizza il suo modello di città virtuale in vari settori tra i quali quello della pianificazione urbana che attraverso il “Municipal Structure Plan for Settlements, Landscape, Public and Facilities” (Richtplan, 2018) guida la crescita e lo sviluppo della città. I vari studi di sviluppo sono stati realizzati e presentati attraverso un modello digitale tridimensionale.

Questi modelli 3D di diverse parti della città di Zurigo contengono essenzialmente i seguenti tre livelli di dati: l'attuale sviluppo edilizio (dal gemello digitale), la capacità edificabile massima secondo la zonizzazione attuale (da un modello parametrico dell'*Esri City Engine*) e possibili target di immagini sotto forma di vari scenari di compattazione (da progetti urbanistici). La visualizzazione del modello 3D in un'applicazione web interattiva ha consentito agli urbanisti di fare un utile confronto tra questi tre livelli di dati da cui è scaturita una preziosa base di discussione sulle scelte progettuali più opportune. Grazie al collegamento dei dati geometrici con i vari parametri urbanistici ed edilizi (ad es. utilizzo dell'edificio, superficie, numero di abitanti e posti di lavoro), sono state anche effettuate analisi mirate e valutazioni quantitative. Tutti i dati emersi da questo processo, realizzato con l'ausilio del DT, hanno costituito la base per lo sviluppo del piano regolatore comunale (Schrotter and Hurzeler, 2020)

Il DT offre un utile contributo anche nell'ambito degli effetti del cambiamento climatico sulla città. Per affrontare tale sfida è stato elaborato il “Sectoral Planning on Heat Reduction” che si concentra principalmente sulla necessità di mantenere funzionali quelle aree urbane che costituiscono caratteristici cor-

tation of the city to simulate possible solutions for issues, which need to be overcome with a sustainable urban planning approach. With this in mind, each component of the digital twin needs to be updated at various intervals and, if necessary, updated with new data in real time. Within the triangle delimited by the real (physical), social and digital world, the Digital Twin connects the real world with the digital world or, more precisely, with its space. Thus, the Digital Twin opens new perspectives for urban planning. Zurich's DT updates a previous 3D model of the city (created in 2011), obtaining a significant increase in the inventory of 3D special data, adding the management of the life cycle of each component, as well as the entire inventory of data, to data modelling and description.

The main spatial 3D data included in

Zurich's DT, processed by Geomatics Surveying operators, concern public spaces, the Utilities Register (energy, waste disposal, water, transport), modelling of façades, bridges, high power lines and, finally, historical items in the city. In order to make information on the DT and its data storage capability available to all, a highly advanced geo-portal was used, allowing access to and visualisation of Open Government Data.

Similar to many other cities, Zurich uses its virtual city model in various departments, including urban planning, which, through the “Municipal Structure Plan for Settlements, Landscape, Public and Facilities” (Richtplan, 2018), follows the city's growth and development. Various studies on this development have been carried out and shown using a 3D digital model.

These 3D models of various parts of

ridoi di aria fredda per i quali l'orientamento, l'estensione e la differenziazione in altezza degli edifici sono determinanti per una buona ventilazione della città. Per studiare gli effetti degli edifici pianificati in tali aree è stato utilizzato il modello digitale 3D basato su GIS, che è stato costruito con i vari dati tratti dal DT (terreno, esistente e pianificato, edifici, posizioni degli alberi, ecc.). Sulla base di modelli climatici su scala meso e micro, è stato possibile determinare l'effetto ostacolo degli edifici pianificati e confrontarlo con lo sviluppo attuale. L'analisi ha mostrato che, a seconda delle caratteristiche spaziali (lunghezza, larghezza, altezza, posizione), i nuovi edifici hanno un'influenza dimostrabile sui fattori climatici ecologicamente rilevanti come la temperatura, la portata del vento e dell'aria fredda. Grazie ai dati affidabili ricavati dal DT, la questione climatica viene integrata in maniera più funzionale nel processo di pianificazione.

## Conclusioni

L'*Urban Digital Twin*, come si è avuto modo di illustrare, consente di poter calibrare le scelte di pianificazione simultaneamente ai processi continui di trasformazione urbana, determinando notevoli vantaggi. La visione obiettiva e imparziale con cui si intende però guardare a questo nuovo e sempre più diffuso modello digitale pone l'obbligo di evidenziare anche alcune importanti criticità. Prima di sviscerare tali criticità si ritiene opportuno puntualizzare quanto sia importante avviare un processo di comunicazione efficace ai fini di facilitare la conoscenza e la diffusione dei vantaggi derivanti dall'utilizzo del *Digital Twin* in ambito urbano. È fondamentale visualizzare i dati spaziali in modo accattivante e performante per gruppi di interesse differenti aumentando così la loro comprensione e il

the city of Zurich basically contain three levels of data – current building development (from the Digital Twin), maximum building capacity, according to current zoning (from parameters provided by the Esri City Engine), and potential targets, with images showing various scenarios of compaction (from urban projects). Being able to view a 3D model in an interactive Web application has allowed town planners to make a helpful comparison among these three levels of data, thus leading to an important starting point from which the most suitable projects could be selected. Linking geometrical data to various urban and building parameters (for instance, building use, surface, number of inhabitants and number of jobs) also allowed for specific analyses and quantitative evaluations. All data, which emerged from this process, thanks to the adoption of

the DT, have provided the basis for the development of the town plan (Schrotter and Hurzeler, 2020).

The usefulness of the DT has also been seen with regard to the effect of climate change in the city. To face this new challenge, “Sectoral Planning on Heat Reduction” has been devised, mainly focusing on the need to ensure the efficiency of areas of the city where the traditional corridors of cold air flow. Therefore, correct calculation of the orientation, extension and specific height of buildings is of crucial importance to ensure a city is properly ventilated. A 3D digital model based on a geographic information system (GIS) has been used to study the effects produced by buildings planned for these areas, uploading information from the DT (existing and planned land, buildings, position of trees, and so on). Based on climate models on

supporto che gli stessi possono fornire al gemello digitale, non trascurando inoltre di garantire l'accesso ai dati e il loro trattamento in modo automatizzato, semplice e attraente.

Per quanto concerne invece le principali criticità, un primo aspetto riguarda la portata economica di un tale modello che necessita di una entità di denaro piuttosto cospicua da investire nei progetti di implementazione della tecnologia intelligente nelle città che, nel caso di mancanza di finanziamenti adeguati, costituirebbe un fattore fortemente discriminante per le stesse. La tutela della privacy dei cittadini – che potrebbe essere compromessa dal processo di acquisizione, registrazione e analisi di tutti i tipi di dati (anche quelli personali e privati) necessari per la realizzazione del DT – è un'altra delle questioni delicate che potrebbe insorgere con il DT e che per essere superata richiederebbe da parte degli enti pubblici l'esecuzione di procedure trasparenti che non consentano l'uso improprio dei dati. La garanzia della sicurezza dei singoli individui, degli organi di governo e persino della città stessa, qualora i dati pubblici vengano rubati dagli hacker, costituisce un ulteriore elemento di possibile criticità da tenere in considerazione. In questo caso, per superare la criticità, la tecnologia intelligente dovrebbe essere crittografata in modo sicuro e protetta con forti protezioni di sicurezza in modo da evitare la manipolazione dei dispositivi sensoriali presenti in vari punti della città. (D'Amanzo and Feijoo Rivas, 2020). Una riflessione va fatta sulle tipologie di tecnologie e di capitali da scegliere e da investire per la realizzazione del DT, evitando che se il processo decisionale della comunità urbana viene affidato a compagnie private e consorzi, i cittadini diventino consumatori e i servizi e i beni comuni sottostiano alle leggi del libero mercato (Grossy and Pianezzi, 2017). Infine,

il rischio in cui si può incorrere, ponendo particolare attenzione all'efficienza dei processi attraverso l'utilizzo delle tecnologie digitali, è quello di focalizzarsi esclusivamente sugli effetti della sostenibilità urbana distraendosi invece dalle cause che hanno determinato le condizioni di insostenibilità.

I rischi evidenziati e le criticità che possono insorgere nel momento in cui una città decide di ricorrere all'*Urban Digital Twin* per avviare processi di trasformazione urbana sostenibile possono comunque essere controllati e gestiti e non inficiano i vantaggi che ne derivano dalla sua applicazione. Il DT consente ai portatori d'interesse della smart city pubblici, privati e della società civile di: seguire il comportamento della città reale e monitorarne l'evoluzione; pianificare e sviluppare progetti, osservando preventivamente gli effetti della loro attuazione sulla sua "gemella"; anticipare eventuali problematiche ed eseguire azioni correttive, prevenendo così l'insorgere di criticità.

In Italia, la prima città che sta programmando di ricorrere all'ausilio del DT a supporto della pianificazione urbana è Bologna. L'esperienza, portata avanti in gemellaggio con la città di Barcellona, è ancora in fase iniziale. Sarebbe auspicabile verificare, nello specifico contesto italiano, se sussistano o siano realizzabili le condizioni normative, di sicurezza, di raccordo fra settori tecnici, amministrativi e di ricerca affinché tale strumento possa essere efficace. Sicuramente scienza, ricerca e conoscenza hanno da sempre rappresentato per la città di Bologna una risorsa fondamentale per immaginare percorsi di innovazione, acquisizione di competenze strategiche e di sviluppo urbano. Sono quindi molteplici e storicamente radicati gli elementi che rendono Bologna la sede ideale per realizzare il primo gemello digitale di città italiano e verificare le condizioni

a meso- and micro-scale, it has been possible to estimate the barrier effect created by the planned buildings, comparing it with current development. Analysis has shown that, according to spatial features (length, width, height, position), the planned buildings have a verifiable effect on ecologically relevant climate factors, such as temperature, and the amount of wind and cold air. Thanks to the reliable data obtained from the DT, climate factors are integrated more effectively into the planning process.

### Conclusions

As shown, the Urban Digital Twin allows to modify planning choices and to simultaneously continue urban expansion with significant benefits. Being, however, duly objective and impartial when looking at this increasingly widespread, new digital model,

one should also take some important critical points into account. Before mentioning them, however, it is worthwhile pointing out how important it is to initiate an effective communication process, so as to increase awareness of the benefits deriving from the adoption of a Digital Twin in an urban environment. Enabling various groups of interest to view spatial data in an appealing and effective way is of the utmost importance. This will improve their understanding and the support they can contribute to the Digital Twin and, no less important, it will grant access to data, as well as its processing, in a simple and attractive fashion. Concerning the aforementioned critical points, one is the financial cost of such a model, for which a conspicuous amount of money will be needed, investing in projects aimed at implementing intelligent technology in cit-

ies. Failing to obtain adequate financial support may turn out to be a strongly discriminating factor for the cities themselves. Another critical point is safeguarding the privacy of citizens – which may be compromised by the process of acquisition, transcription and analyses of all data (including personal and private data) necessary to set up the DT. To be overcome, this obstacle would require transparent procedures on the part of public institutions, forbidding any improper use of data. Guaranteeing the safety of single individuals, government bodies and the city itself is another critical point to take into account, should hackers steal public data. This could be counteracted through safe encryption of smart technology, with strong safety barriers, so as to prevent sensors located around the city from being manipulated (D'Amanzo, Feijoo Rivas, 2020/2021).

Great attention should be paid to the type of technology chosen and the money to be invested in setting up the DT. If private companies and associations are to be entrusted with making the right decisions on behalf of the urban community, it is important, therefore, to avoid citizens from becoming consumers, and services and common goods from being subject to free market laws (Grossy and Pianezzi, 2017). Finally, there is also the risk that, focusing mainly on the efficiency of the digital technology adopted, concentration on urban sustainability may deflect attention from the very causes of the existing unsustainability, focusing solely on its effects. The risks and crucial aspects pointed out above, which may occur when a city decides to adopt an Urban Digital Twin to carry out a sustainable urban transformation can, however, be moni-

per la sua applicabilità. Esso consiste in un progetto di replica digitale della struttura cittadina che, attraverso i dati, il machine learning e *Internet of Things* (IoT) permette di ottimizzare, innovare, costruire scenari e fornire nuovi servizi, di aumentare la partecipazione dei cittadini e sperimentare risposte d'avanguardia in particolare negli ambiti chiave europei del *Green Deal* e dell'economia al servizio delle persone.

La spiegazione di chi scrive è che l'*Urban Digital Twin* possa divenire uno strumento di uso sempre più comune in ambito urbanistico riuscendo a superare una delle sue principali criticità, ovvero quella dei costi elevati di realizzazione e gestione, nella convinzione che tale strumento segna un importante momento di progresso scientifico e tecnologico e come per tutte le espressioni del progresso il vantaggio che le città ne ricaveranno dipenderà dalla sapienza di chi lo gestirà.

## REFERENCES

- Batty, M. et al. (2012), "Smart cities of the future", *The European Physical Journal Special Topics* Vol. 214, pp. 481-518.
- Batty, M. (2018), "Digital twins", *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol. 45, n. 5, pp. 817-820.
- Biljecki, et al. (2015), "Application of 3D city models: state of the art review", *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, Vol. 4, pp. 2842-2889.
- Caragliu, A., Del Bo, C. and Nijkamp P. (2009), *Smart Cities in Europe*, VU University Amsterdam, Faculty of Economics, Business Administration and Econometrics, Research Memoranda 0048, Amsterdam, The Netherlands.
- City2City (2020), *Singapore, Helsinki and Zurich top index of world's smartest cities*, available at: <https://city2city.network/singapore-helsinki-and-zurich-top-index-worlds-smartest-cities> (accessed 15 October 2021).
- D'Amanzo, C. and Feijoo Rivas S.C. (2020), *Urban Digital Twin come strumento a supporto della prassi di pianificazione a scala urbana per il cambiamento climatico*, Tesi di laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design (a.a.2020/2021) relatore Prof. Guido Callegari.
- Epifani, S. (2020), *Perché la sostenibilità non può fare a meno della trasformazione digitale*, Digital transformation Institute, Roma.
- Giavano, S. (2021), "Smart City and Digital Twin: definitions, Methodologies and Applications" in Del Giudice, M. and Osello, A. (2021), *Developing Smart Cities Based On Digital Twins*, IG Global, Hershey PA, USA 17033, pp.243-264.
- Grossy, G. and Pianezzi, D. (2017), "Smart cities: utopias or neoliberal ideology?", *University of Essex Research Repository*, Vol. 69, pp. 79-85.
- Hidalgo, A. and Belliard, D. (2020) *Le Manifest pour Paris*, Terra Nova, available at: <http://www.tnova.fr> (accessed 08 August 2022).
- Kaur, M. J. et al. (2020), "The Convergence of Digital Twin, IoT, and Machine Learning: Transforming Data into Action" In Farsi M et al. (Eds.), *Digital Twin Technologies and Smart Cities. Internet of Things (Technology, Communications and Computing)*, Springer.
- Richtplan (2018), *Kommunaler Richtplan Stadt Zürich*, available at: <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/staedtebau/planung/richtplanung/kommunaler-richtplan.html> (accessed 08 August 2022).
- Risoluzione del parlamento Europeo (2011), *Agenda Urbana Europea e il suo futuro nel quadro politico di coesione* in Gazzetta Ufficiale dell'UE 18/12/2012.
- Gemeente Rotterdam, *Rotterdam 3D*, available at: <https://www.3drotterdam.nl/#/> (accessed 8 October 2021).
- Schrotter, G. and Hürzeler, C. (2020), "The digital twin of the city of Zurich for urban planning", *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, Vol. 88, n. 1, pp. 99-112.
- SustainEurope (2019). *Smart Helsinki*, available at: <https://www.sustaineurope.com/smart-helsinki-20191025.html> (accessed 15 October 2021).

tored and managed without lessening the advantages deriving from its application. The DT allows all public and private members of civil society who care about smart cities to follow the actual trend of a city and monitor its evolution, to devise and develop projects by first observing their potential effects on its "twin", anticipating possible problems and carrying out corrections, thus preventing any complications from occurring.

In Italy, the first city that is going to adopt the DT for urban planning is Bologna. This process, twinned with the city of Barcelona, is still in an initial phase. It could be useful to verify, specifically in Italy, if all conditions regarding legal and safety aspects, and harmonisation among technical, administrative and research sectors are in place, so that this tool might be effective. Science, research

and knowledge have no doubt been a fundamental resource for Bologna, to envision innovation processes, and for the acquisition of strategic and urban development competences. Thanks to the many historically rooted elements, which characterise it, Bologna is the ideal site for the first Digital Twin in Italy, verifying if there are the conditions to apply it. The project consists of a digital replica of the city which, through data, machine learning and the Internet of Things (IoT), makes it possible to optimise, innovate, and view potential scenarios, and provide new services, increase citizens' involvement, and test state-of-the-art solutions, particularly in the key European spheres of the Green Deal and economy at the service of the people. Our hope is that the use of the Urban Digital Twin may become increasingly common in urban planning, overcom-

ing one of its main difficulties, i.e. high costs of implementation and management, knowing that this tool marks a turning point in scientific and technological progress and, as typically happens with progress, the advantages for cities will depend on the wisdom of its users.

# Cittadinanza energetica. Strumenti e tecnologie per abilitare la transizione nei distretti

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

Danila Longo, <https://orcid.org/0000-0002-7516-7556>  
Saveria Olga Murielle Boulanger, <https://orcid.org/0000-0003-2147-3192>  
Martina Massari, <https://orcid.org/0000-0002-5483-5869>  
Giulia Turci, <https://orcid.org/0000-0003-0930-0838>  
Dipartimento di Architettura, Università di Bologna, Italia

SAGGI E PUNTI  
DI VISTA/  
ESSAYS AND  
VIEWPOINT

danila.longo@unibo.it  
saveria.boulanger@unibo.it  
m.massari@unibo.it  
giulia.turci3@unibo.it

**Abstract.** Le risposte alla crisi energetica attuale e all'azione contro il cambiamento climatico in generale hanno prodotto una grande varietà di sperimentazioni. I PEDs (Positive Energy Districts) e le Comunità Energetiche si stanno diffondendo come "aggregatori" di tecnologie abilitanti, ma le conoscenze e le competenze necessarie per pianificare, implementare e monitorare necessitano di ulteriore sviluppo. La tecnologia da sola, infatti, non è sufficiente per facilitare la condivisione delle conoscenze, la sperimentazione e la co-creazione delle soluzioni. Il contributo mette a fuoco modalità e strumenti che consentono di supportare la creazione di "cittadini energetici", attraverso le riflessioni sviluppate nel progetto H2020 GRETA (Green Energy Transition Actions) e nella COST Action 'PED-EU-NET'.

**Parole chiave:** Cittadinanza energetica; Positive energy districts (PEDs); Neutralità climatica; Transizione energetica; Comunità.

## Introduzione

La pianificazione strategica europea pone la necessità di accelerare notevolmente sulle politiche energetiche e ambientali e sulla messa in atto di azioni ad ampio raggio che abbiano impatti efficaci, immediati e a lungo termine (European Commission, 2019b). Questo è confermato dagli ultimi report IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (IPCC, 2022a, 2022b), ma anche dai più recenti avvenimenti socio-politico-economici che stanno mettendo a dura prova l'applicabilità (e la popolarità) delle strategie ambientali a fronte delle gravi emergenze energetiche causate dalle attuali questioni geopolitiche. Le città necessitano di strategie efficaci e condivise per la transizione verso la neutralità climatica anche accelerando il ricorso alle frontiere tecnologiche. Al contempo, appare evidente come la sola implementazione tecnologica non sia sufficiente: il coin-

volgimento della cittadinanza e, soprattutto, di una cittadinanza attiva, informata e concorde risulta necessario (European Commission, 2019a). Tuttavia, il dialogo attorno a processi tecnici, legati ad esempio all'uso e consumo dell'energia, è complesso a causa delle difficoltà tecnico-operative del tema dell'energia, ma anche per la scarsa chiarezza e disponibilità dei dati relativi alla sua produzione, uso e consumo, per ragioni a volte di *privacy*, o legate al mercato o, ancora, per ragioni politiche. Se il coinvolgimento della cittadinanza rispetto ai temi dei consumi domestici e delle strategie di base relative al risparmio energetico in casa e in ufficio avviene in maniera più diffusa, l'attivazione di dinamiche di gruppo, la comprensione del funzionamento delle reti altamente tecnologiche, come la *smart grid*, il coinvolgimento dei singoli in processi multi-attore di autoconsumo e produzione energetica risulta solo recentemente perseguito. È in questa direzione che si muovono, per esempio, le Comunità Energetiche (CE) ma anche i più innovativi *Positive Energy Districts* (PEDs). In EU, infatti, sono in fase di definizione, sviluppo e sperimentazione questo tipo di soluzioni tecnologicamente avanzate per distretti urbani energeticamente performanti, così come soluzioni per la creazione di comunità energetiche di mutuo scambio tra cittadini e imprese, strategie per l'inclusione dei singoli in processi ampi che coinvolgono non solo gli utenti finali ma anche produttori, municipalità, grandi e medie aziende.

In questo contesto si posizionano alcune ricerche volte a comprendere come la cittadinanza energetica possa essere sviluppa-

## Energy citizenship. Tools and technologies to enable transition in districts

**Abstract.** Responses to the current energy crisis and to action against climate change have produced a wide variety of experimentations. Positive Energy Districts (PEDs) and Energy Communities (EC) are spreading as aggregators of enabling technologies, but the knowledge and skills required to plan, implement and monitor them still need to be developed. Technology alone is not enough to facilitate knowledge sharing and the experimentation and co-creation of solutions. The paper focuses on methods and tools that allow to support the creation of "energy citizens" through considerations developed in project H2020 GRETA (Green Energy Transition Actions) and in COST Action 'PED-EU-NET'.

**Keywords:** Energy citizenship; Positive Energy Districts (PEDs); Climate neutrality; Energy transition; Community.

## Introduction

European strategic planning needs to significantly accelerate energy and environmental policies and favour the implementation of wide-ranging actions that have effective, immediate and long-term impacts (European Commission, 2019b). This is confirmed by the latest IPCC reports (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (IPCC, 2022a, 2022b) but also by the most recent socio-political-economic events that are putting a strain on the applicability (and popularity) of environmental strategies in the face of the serious energy emergencies caused by the war in Ukraine. Cities need effective and shared strategies for the transition toward climate neutrality also by accelerating the use of technological frontiers. At the same time, it is clear that technological implementation alone is not enough: the

involvement of citizens and, above all, of active and informed citizens acting unanimously is necessary (European Commission, 2019a). At the same time, the dialogue around technical processes, such as energy use and consumption, appears complex. The reasons are to be found in the technical and operational difficulty of the energy issue, but also in the lack of openness of data relating to its production, use and consumption, for both market and political reasons.

Though the citizen's involvement takes place more widely with respect to domestic consumption, the activation of group dynamics, the understanding of highly technological networks, such as smart grids, and the involvement of individuals in self-consumption and energy production multi-actor processes has only been recently pursued. Energy Communities (CE) but

ta e sostenuta nel tempo. Il presente articolo intende contribuire a questo filone di ricerca, presentando e proponendo alcuni strumenti, strategie e riflessioni derivati da due progetti finanziati dalla Commissione Europea: Horizon 2020 – GRETA (GReen Energy Transition Actions; GA101022317) e la COST Action ‘Positive Energy District European Network’.

Il presente contributo è articolato in cinque sezioni. La prima propone una revisione qualitativa della letteratura di riferimento per i temi di cittadinanza energetica e PEDs; la seconda definisce le metodologie della ricerca; la terza e la quarta pongono strumenti operativi rispettivamente in casi PEDs e in un caso reale identificato in un’ampia area urbana della città di Bologna. Infine, la quinta sezione propone alcune riflessioni e possibili sviluppi futuri della ricerca.

### **La cittadinanza energetica in Europa: un tema ancora da chiarire nel suo rapporto con le tecnologie innovative**

Una ricerca su *Google Scholar* evidenzia come fino al 2004-2005 non siano quasi presenti articoli che menzionano il concetto, fatta eccezione per (Devine-Wright, P., 2004), considerato il primo articolo di rilievo e in cui si approccia il tema. Tra il 2006 e il 2010 sono presenti 38 articoli che affrontano la questione, anche se la locuzione “*energy citizenship*” tende a non apparire nei titoli. Dall’analisi affrontata, Devine-Wright (Devine-Wright, 2006; Walker and Devine-Wright, 2008) appare comunque pioniere nella ricerca sulla tematica. Una presenza più importante

Quello della cittadinanza energetica è un concetto recente, che emerge a cavallo degli anni 2004-2010 come tema chiave della transizione energetica europea e mondiale.

also the most innovative Positive Energy Districts (PEDs) are moving in this direction. In the EU, in fact, this type of technologically advanced solutions for energy-performing urban districts, together with solutions for the creation of energy communities of mutual exchange between citizens and businesses, and strategies for the inclusion of individuals in broad processes that involve not only end users but also producers, municipalities and large and medium-sized companies are being developed.

In this context, some research is positioned to understand how energy citizenship can be developed and supported over time. This paper aims to contribute to such a line of research, presenting and proposing some tools, strategies and reflections derived from two projects funded by the European Commission: GRETA (GReen Energy

Transition Actions; GA101022317) and COST Action ‘Positive Energy District European Network’. Indeed, the research aims at highlighting some tools that can involve citizens. The contribution is divided into 5 sections. The first proposes a qualitative review of the reference literature for energy citizenship and PED issues; the second defines research methodologies; the third and fourth propose operational tools, respectively, in PEDs cases and in a real case identified in a large area of the city of Bologna. Finally, the fifth section proposes some reflections and future research lines.

#### **Energy citizenship in Europe: a theme to be clarified in its relationship with innovative technologies**

Energy citizenship is a fairly recent concept, emerging at the turn of the years 2004-2010 as a European and

della locuzione, soprattutto nei titoli, avviene nel quinquennio successivo (2011-2015), periodo in cui sono presenti 135 articoli sul tema. Questa attenzione crescente è confermata nei periodi successivi: tra il 2016 e il 2020 appaiono 377 articoli sul tema e nell’ultimo biennio 2021-2022, 364. Questa breve verifica conferma come la cittadinanza energetica stia vedendo un interesse crescente e come ci sia una urgenza nella identificazione di metodologie e strategie per un maggior coinvolgimento della società civile nella transizione energetica (European Commission, 2019a; Schlindwein and Montalvo, 2022; Schot, J. et al., 2016). Il concetto di “cittadinanza energetica”, infatti, fa riferimento al coinvolgimento attivo di persone non specializzate all’interno di un sistema complesso, come quello energetico. Con coinvolgimento attivo si intende la presenza di azioni volontarie, dirette e concrete che i cittadini operano all’interno del settore energetico. Secondo la letteratura sul tema, l’inclusione dei cittadini nei processi decisionali relativi al sistema energetico influenza la più generale risposta della comunità a innovazioni e interventi nel settore e sostiene una migliore accettazione delle soluzioni di decarbonizzazione (Schlindwein and Montalvo, 2022; Sovacool et al., 2020). Nonostante la locuzione “cittadinanza energetica” sia solo una delle più recenti (si ricordano, per esempio le locuzioni “cittadinanza performativa” o “cittadinanza sostenibile” o “democrazia energetica”), l’associazione del termine “cittadino” a quello di “energia” mette in luce una precisa connessione tra diritti e doveri dell’individuo e l’energia stessa. Devine-Wright afferma come il pubblico sia concepito come parte attiva nell’evoluzione del sistema energetico e come il suo potenziale di azione sia inquadrato da nozioni di diritto e di responsabilità equi in tutta la società per affrontare le conseguenze del consumo di ener-

global energy transition key theme. A search on Google Scholar shows that until 2004-2005 there were almost no articles mentioning the concept, except for the one by Devine-Wright (Devine-Wright, P., 2004), which is considered the first relevant paper on the theme. Between 2006 and 2010 there are 38 papers addressing the issue, although the phrase “*energy citizenship*” tends not to appear in the headlines. From the addressed analysis, Devine-Wright (Devine-Wright, 2006; Walker and Devine-Wright, 2008) appears to be a pioneer in research on the subject. A more important presence of the phrase, especially in the titles, takes place in the following five years (2011-2015), when there are 135 papers on the subject. This growing attention is confirmed in the following periods: in 2016 and 2020, 377 papers appear on the subject, and 364

in the last two years 2021-2022. This brief review confirms how energy citizenship is meeting a growing interest, and how there is an urgency in identifying methodologies and strategies for greater involvement of civil society in the energy transition (European Commission, 2019a; Schlindwein and Montalvo, 2022; Schot, J. et al., 2016). The concept of “*energy citizenship*”, in fact, refers to the concept of active involvement of non-specialised people within a complex system, such as the energy one. Active involvement generally means the presence of voluntary, direct and concrete actions that citizens operate within the energy sector. According to several authors, the inclusion of citizens in decision-making processes related to the energy system influences the more general community response to innovations and interventions in the sector, and supports a

gia, in particolare il cambiamento climatico (Devine-Wright, P., 2004). Questi aspetti di diritto e responsabilità sono elementi chiave della definizione, poiché da un lato definiscono come l'energia debba essere un diritto di tutti; quindi, essere accessibile a tutti coloro che vivono in una condizione di cittadinanza (incluse le persone economicamente più fragili), dall'altro come esista una responsabilità dei singoli nel supportare una miglior gestione, consumo e produzione della stessa a livello urbano e territoriale (Olivadese *et al.*, 2021; Wahlund and Palm, 2022)

Per quanto il tema sia largamente diffuso nel dibattito scientifico, una definizione certa e largamente accettata sembra non essere presente, non solo dal suo punto di vista teorico, ma soprattutto da quello operativo (Beauchampet and Walsh, 2021; Lennon *et al.*, 2020; Schlindwein and Montalvo, 2022; Wahlund and Palm, 2022). Un elemento che sembra quasi interamente mancare è la relazione che intercorre tra la necessità di coinvolgere la cittadinanza in forme più attive e tecnologie e strumenti necessari per farlo. In particolare, due innovazioni chiave possono supportare questa direzione: le Comunità Energetiche e i Positive Energy Districts o distretti ad energia positiva.

Le Comunità Energetiche possono essere generalmente definite come gruppi di utenti (privati, pubblici o entrambi) che si organizzano o auto-organizzano per condividere energia (Boulanger *et al.*, 2021; Rathnayaka *et al.*, 2011). Le recenti evoluzioni normative europee e italiane tendono a favorire questo tipo di raggruppamento, motivo per cui diverse comunità energetiche sono nate a livello europeo e stanno nascendo in Italia.

I *Positive Energy Districts* si configurano come modello innovativo di transizione energetica (Sareen *et al.*, 2022). Introdotti nel panorama europeo dallo *Strategic Energy and Technology Plan*

better acceptance of decarbonisation solutions (Schlindwein and Montalvo, 2022; Sovacool *et al.*, 2020).

Although the phrase "energy citizenship" is only one of the most recent (recall, for example, the phrases "performative citizenship" or "sustainable citizenship" or "energy democracy"), the juxtaposition of the term "citizen" with "energy" highlights a precise connection between the rights and duties of the individual and the energy itself. Devine-Wright reflect on how the public is conceived as an active part in energy system evolution, and how its potential for action is framed by notions of fair law and responsibility throughout society to address energy consumption consequences, in particular related to climate change (Devine-Wright, P., 2004). These aspects of law and responsibility are key elements of the definition since, on

the one hand, they define how energy must be a right of all; therefore, it must be accessible to all those who live in a condition of citizenship (including the most economically fragile people), and, on the other hand, how there is a responsibility of individuals in supporting better management, consumption and production of the same at urban and territorial level (Olivadese *et al.*, 2021; Wahlund and Palm, 2022). Although the theme is extensively discussed in the scientific debate, a definitive and widely accepted definition seems not to be present, not only from its theoretical point of view, but above all from the operational one (Beauchampet and Walsh, 2021; Lennon *et al.*, 2020; Schlindwein and Montalvo, 2022; Wahlund and Palm, 2022). An element that appears to be almost entirely missing is the relationship between the need to involve citizens in

(SET-Plan Working Group 3.2, 2018), vengono definiti come aree urbane efficienti e flessibili dal punto di vista energetico che producono zero emissioni nette di gas a effetto serra e gestiscono attivamente una produzione annuale di energia rinnovabile locale o regionale (JPI Urban Europe, 2020). Il successo delle sperimentazioni PEDs è strettamente legato all'adozione di soluzioni tecnologiche localmente specifiche e innovative ma, anche all'accettazione e alla partecipazione alle stesse da parte dei cittadini (Cheng *et al.*, 2022) e di tutti gli attori fin dalle prime fasi di pianificazione (Ahlers *et al.*, 2019).

### Metodologia e Obiettivi

La ricerca è stata svolta utilizzando una metodologia qualitativa basata su due approcci paralleli:

- aggiornamento dello stato dell'arte e conseguente identificazione di alcuni strumenti e strategie emergenti;
- studio e test di uno strumento (*Community Transition Pathway*) in un contesto reale, la città di Bologna (Italia), dove diverse strategie di transizione verso la creazione di nuove comunità energetiche e la predisposizione di un distretto ad energia quasi zero sono in corso.

A partire da questa analisi, obiettivo del contributo è sistematizzare alcune possibili linee strategiche per supportare l'evoluzione tecnologica e sostenibile nei quartieri, attraverso strumenti che aiutino le comunità stesse ad essere autonome, informate e attive.

### Strumenti abilitanti: i Positive Energy Districts

I PEDs, così come le comunità energetiche, sono infrastrutture complesse di tipo socio-tec-

more active forms of participation in energy production and management, and the technology necessary to act in this direction. In particular, two key innovations emerge in this direction, aimed at facilitating or regulating this type of interaction, precisely Energy Communities and Positive Energy Districts or positive energy districts. Energy Communities can generally be defined as groups of users (private, public or both) who are organised or self-organised to share energy (Boulanger *et al.*, 2021; Rathnayaka *et al.*, 2011). Recent European and Italian regulatory developments favour this type of grouping, which is the reason why several energy communities were born at the European level and are being created in Italy.

Positive Energy Districts are configured as an innovative model of energy transition (Sareen *et al.*, 2022). Intro-

duced to the European scene by the Strategic Energy and Technology Plan (SET-Plan Working Group 3.2, 2018), they are defined as energy-efficient and flexible urban areas that produce net-zero greenhouse gas emissions and actively manage annual local or regional renewable energy production (JPI Urban Europe, 2020). The success of PEDs experiments is, therefore, closely linked to the adoption of locally specific and innovative technological solutions but also to their acceptance and participation by citizens (Cheng *et al.*, 2022) and by all actors from the earliest planning stages (Ahlers *et al.*, 2019).

### Methodology and Objectives

The research was carried out using a qualitative methodology based on two parallel approaches:

- a state-of-the-art update, with the

nico in grado di coniugare la componente tecnologica agli aspetti ambientali, sociali ed economici. A partire dall'analisi della letteratura e dei principali progetti di ricerca attualmente in corso in Europa, sono stati schedati i più interessanti strumenti volti a facilitare il processo di realizzazione, replica e scalabilità dei PEDs (Tab. 1).

La schedatura ha permesso di individuare tre principali categorie di strumenti:

- Strumenti per facilitare la conoscenza: raccolte di casi studio, progetti, buone pratiche e lezioni apprese che mettono a sistema esperienze e soluzioni innovative facilitando la conoscenza del modello PED. In particolare, il *Booklet of PEDs*, sviluppato da JPI Urban Europe, si struttura come una raccolta di casi studio di riferimento al fine di identificare le caratteristiche comuni, le strategie, le sfide e gli elementi di successo per guidare gli stakeholders nell'implementazione (Bossi *et al.*, 2020). Il *PED Database*, in corso di realizzazione nell'ambito della COST Action 'PED-EU-NET' in collaborazione con le iniziative Annex 83 (available at: <https://annex83.iea-ebc.org/>) e JPI UE (available at: <https://jpi-urbaneurope.eu/ped/>), può essere considerato un'evoluzione in formato digitale del Booklet. Il Database si strutturerà come una vera e propria piattaforma *open access* interoperabile, in cui sarà possibile esplorare e comparare casi studio, progetti, iniziative, strategie, policies e soluzioni rilevanti per lo sviluppo di questi distretti (Turci *et al.*, 2022). La *PED Learning Community*, realizzata dal progetto H2020-Atelier, è una piattaforma online che facilita la conoscenza del concetto di PED attraverso la sistematizzazione di materiali informativi, video-lezioni e

workshops e la promozione di attività di networking che coinvolgono cittadini ed esperti ("Atelier project, PED Learning Community Platform," 2022).

- Strumenti per supportare il coinvolgimento degli stakeholders: mirano a facilitare la partecipazione di questi ultimi nelle diverse fasi di implementazione di interventi alla scala di distretto. Il progetto +CityxChange, nelle città pilota di Limerick e Groningen, lavora allo sviluppo di un modello condiviso per la realizzazione di laboratori urbani partecipativi – *Innovation Playgrounds* – in cui ricercatori, professionisti, municipalità, associazioni e cittadini collaborano alla sperimentazione di soluzioni innovative in chiave PEDs (Mee *et al.*, 2021). Nell'ambito dell'iniziativa internazionale Annex 83 'Positive Energy Districts', lo studio condotto da (Cheng *et al.*, 2022) propone di ampliare la *PED Toolbox* sviluppando uno strumento per mappare gli stakeholders coinvolti nelle diverse fasi del processo di realizzazione di un PED.
- Strumenti per agevolare il processo decisionale e concretizzazione: si tratta principalmente di metodologie *step-by-step* che accompagnano l'implementazione dei PEDs con una particolare attenzione alla fase di pianificazione dell'intervento. La ricerca svolta (Civiero *et al.*, 2022, 2021) propone un modello di simulazione innovativo, denominato PEDRERA, per supportare azioni di riqualificazione in chiave PED da applicare in contesti urbani consolidati. Nell'ambito del progetto di ricerca *Making-City* viene sviluppata una metodologia per accompagnare le città nell'implementazione dei PEDs: a partire dallo studio delle componenti urbane e dall'analisi degli strumenti di pianificazione.

identification of emerging tools and strategies referred to net-zero energy districts;

- study and testing of a tool (Community Transition Pathway) in a real context of Bologna city (Italy), where different transition strategies towards the creation of new energy communities and the preparation of a nearly zero energy district are underway.

Starting from this analysis, the aim of the contribution is to identify some possible strategic lines to support technological and sustainable evolution in the neighbourhoods through tools that help the communities themselves to be autonomous, informed and active.

#### **Enabling tools for Positive Energy Districts**

PEDs (Positive Energy Districts), as well as Energy Communities, are com-

plex socio-technical infrastructures able to combine the technological component with environmental, social and economic aspects. Starting from the analysis of the literature and the main research projects currently ongoing in Europe, the most interesting tools aimed at facilitating the process of implementation, replication and scalability of PEDs have been analysed. (Table 1).

The analysis allowed to identify three main categories of tools:

- Tools to facilitate knowledge: collections of case studies, projects, best practices and lessons learned that bring together experiences and innovative solutions facilitating the knowledge of the PED model. In particular, the Booklet of PEDs, developed by JPI Urban Europe, is structured as a collection of case studies in order to identify common

characteristics, strategies, challenges and elements of success to guide stakeholders in the implementation of PEDs (Bossi *et al.*, 2020). The *PED Database*, currently under construction as part of the COST Action 'PED-EU-NET' activities, in

collaboration with Annex 83 and JPI UE initiatives, can be considered the digital format evolution of the Booklet. The Database will be structured as a real interoperable *open access* platform, where it is possible to explore and compare case studies, projects, initiatives, strategies, policies and solutions relevant to the development of districts (Turci *et al.*, 2022). *PED Learning Community*, developed by the H2020 Atelier project, is an online platform that facilitates the knowledge of the PED concept through the systematisation of information materials,

video-lessons and workshops, and through the promotion of networking activities involving citizens and experts ("Atelier project, PED Learning Community Platform," 2022).

- Tools to support stakeholder involvement aim at facilitating the participation of stakeholders in the different stages of implementation of interventions at the district scale. The +CityxChange project, in the pilot cities of Limerick and Groningen, is working on the development of a shared model for participatory urban laboratories - *Innovation Playgrounds* - in which researchers, practitioners, municipalities, associations and citizens collaborate to test innovative solutions in PEDs (Mee *et al.*, 2021). As part of the international Annex 83 'Positive Energy Districts' initiative, the study

<b>Booklet of PEDs</b> <b>Reference project:</b> Positive Energy Districts and Neighbourhoods   <b>Funding programme:</b> JPI Urban Europe   <b>Realisation year:</b> 2020 <b>Source:</b> <a href="https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2020/06/PED-Booklet-Update-Feb-2020_2.pdf">https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2020/06/PED-Booklet-Update-Feb-2020_2.pdf</a>		
<b>Main Characteristics</b> <b>Application scale:</b> <input type="checkbox"/> Building <input checked="" type="checkbox"/> District <input type="checkbox"/> City <b>Application context:</b> <input checked="" type="checkbox"/> New construction <input type="checkbox"/> Renovation <b>Users target:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Citizens <input type="checkbox"/> Municipalities <input type="checkbox"/> Professionals/Researchers <b>Application phase:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Planning <input type="checkbox"/> Implementation <input type="checkbox"/> Monitoring <b>Case studies:</b> Yes - 29 PED-case studies e 32 PED-like case studies	<b>Brief description</b> <b>Scope</b> collecting and analysing a compilation of case studies of sustainable urbanization and energy transition at district scale. <b>Structure</b> divided into two sections: PED case studies and PED-like case studies. Each section is divided accordingly into already implemented cases, in implementation phase and in planning phase.	
<b>PED Database</b> <b>Reference project:</b> Positive Energy District European Network (PED-EU-NET)   <b>Funding programme:</b> COST Action   <b>Realisation year:</b> ongoing   <b>Source:</b> <a href="https://pedeu.net/">https://pedeu.net/</a>	<b>Main Characteristics</b> <b>Application scale:</b> <input type="checkbox"/> Building <input checked="" type="checkbox"/> District <input type="checkbox"/> City <b>Application context:</b> <input checked="" type="checkbox"/> New construction <input type="checkbox"/> Renovation <b>Users target:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Citizens <input type="checkbox"/> Municipalities <input type="checkbox"/> Professionals/Researchers <b>Application phase:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Planning <input type="checkbox"/> Implementation <input type="checkbox"/> Monitoring <b>Case studies:</b> Yes - constantly updating.	<b>Brief description</b> <b>Scope</b> mapping existing concepts, strategies, projects, case studies, technological and non-technological solutions related to PEDs in Europe, to support municipalities through the decision-making process of PED implementation. <b>Structure</b> divided into Questionnaire 1 - contains sections A, B, C and describes PED Case studies and PED Labs – and into Questionnaire 2 - contains section D (Projects and Initiatives), Section E (National Policies and Strategies), section F (Technological/Non-Technological solutions).
<b>PED Learning Community Platform</b> <b>Reference project:</b> Atelier - AmsTERdam BiLbao citizen drivEn smaRt cities   <b>Funding programme:</b> Horizon 2020 programme   <b>Realisation year:</b> 2022   <b>Source:</b> <a href="https://www.pedlearning.eu/">https://www.pedlearning.eu/</a>	<b>Main Characteristics</b> <b>Application scale:</b> <input type="checkbox"/> Building <input checked="" type="checkbox"/> District <input type="checkbox"/> City <b>Application context:</b> <input checked="" type="checkbox"/> New construction <input type="checkbox"/> Renovation <b>Users target:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Citizens <input type="checkbox"/> Municipalities <input type="checkbox"/> Professionals/Researchers <b>Application phase:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Planning <input type="checkbox"/> Implementation <input type="checkbox"/> Monitoring <b>Case studies:</b> Amsterdam (NL)	<b>Brief description</b> <b>Scope</b> open access learning place for online e-learning and interaction between different users and experts to understand how to implement PEDs in different contexts. <b>Structure</b> divided in 3 sections: 'PED Start Guide' where PED concept is presented, 'Community' for the networking between users and for giving feedback on the platform interoperability and 'Best resources' where the information material related to the PEDs is collected.
<b>Innovation Playground Framework</b> <b>Reference project:</b> +CityChange   <b>Funding programme:</b> Horizon 2020 programme   <b>Realisation year:</b> 2020   <b>Source:</b> <a href="https://citychange.eu/knowledge-base/d3-3-framework-for-innovation-playgrounds/">https://citychange.eu/knowledge-base/d3-3-framework-for-innovation-playgrounds/</a>	<b>Main Characteristics</b> <b>Application scale:</b> <input type="checkbox"/> Building <input checked="" type="checkbox"/> District <input type="checkbox"/> City <b>Application context:</b> <input checked="" type="checkbox"/> New construction <input type="checkbox"/> Renovation <b>Users target:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Citizens <input type="checkbox"/> Municipalities <input type="checkbox"/> Professionals/Researchers <b>Application phase:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Planning <input type="checkbox"/> Implementation <input type="checkbox"/> Monitoring <b>Case studies:</b> Limerick (IR), Groningen (NL)	<b>Brief description</b> <b>Scope</b> framework that promotes an open innovation approach, based on the engagement of a wide range of stakeholders (quadruple helix model). <b>Structure</b> participatory laboratories structured around three key elements: 'System' – describing the elements that constitute the playgrounds (places, activities, data, enabling mechanism), 'Journey' – defining the steps that lead to Playground implementation and 'Localisation' – investigating PEDs implementation potentiality in the local context.
<b>Stakeholders Mapping</b> <b>Reference project:</b> Annex83 'Positive Energy Districts'   <b>Funding programme:</b> IEA-EBC programme   <b>Realisation year:</b> 2022   <b>Source:</b> <a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-6269-0_38">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-6269-0_38</a>	<b>Main Characteristics</b> <b>Application scale:</b> <input type="checkbox"/> Building <input checked="" type="checkbox"/> District <input type="checkbox"/> City <b>Application context:</b> <input checked="" type="checkbox"/> New construction <input type="checkbox"/> Renovation <b>Users target:</b> <input type="checkbox"/> Citizens <input checked="" type="checkbox"/> Municipalities <input type="checkbox"/> Professionals/Researchers <b>Application phase:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Planning <input type="checkbox"/> Implementation <input type="checkbox"/> Monitoring <b>Case studies:</b> N/A	<b>Brief description</b> <b>Scope</b> operational and systematic approach for mapping the stakeholders in the different PEDs development phases. <b>Structure</b> matrix composed of eight categories of actors involved in the distinct phases of project development (I. general planning of the intervention, II. energy planning, III. planning of the construction or redevelopment process, IV. implementation of the intervention, V. implementation phase, VI. monitoring, VII. post-intervention assessment) and subdivided by proximity levels (building, district and city).
<b>PEDRERA. Positive Energy District renovation model</b> <b>Reference project:</b> TECNIOspring PLUS   <b>Funding programme:</b> H2020 programme Marie Skłodowska-Curie   <b>Realisation year:</b> 2021   <b>Source:</b> <a href="https://doi.org/10.3390/en14102832">https://doi.org/10.3390/en14102832</a>	<b>Main Characteristics</b> <b>Application scale:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Building <input checked="" type="checkbox"/> District <input type="checkbox"/> City <b>Application context:</b> <input type="checkbox"/> New construction <input checked="" type="checkbox"/> Renovation <b>Users target:</b> <input type="checkbox"/> Citizens <input checked="" type="checkbox"/> Municipalities <input type="checkbox"/> Professionals/Researchers <b>Application phase:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Planning <input type="checkbox"/> Implementation <input type="checkbox"/> Monitoring <b>Case studies:</b> Barcelona, Palma de Maiorca (ES)	<b>Brief description</b> <b>Scope</b> multidimensional model aimed at promoting large-scale urban regeneration processes in Positive Energy District perspective. <b>Structure</b> step-by-step approach, structured as follows: step I - aggregation of data in 4 domains (business models, environmental issues, operational issues and social issues), step II - stakeholders mapping and definition of the main requirements, step III - definition of retrofit measures and cost analysis, step IV - priority KPIs evaluation and definition of possible scenarios, step V, step VI, step VII - realization of the intervention.
<b>Methodology and guidelines for PED design</b> <b>Reference project:</b> Making City   <b>Funding programme:</b> H2020 programme   <b>Realisation year:</b> 2020   <b>Source:</b> <a href="https://makingcity.eu/wp-content/uploads/2021/12/MakingCity_D4_1_Methodology_and_Guidelines_for_PED_design_final.pdf">https://makingcity.eu/wp-content/uploads/2021/12/MakingCity_D4_1_Methodology_and_Guidelines_for_PED_design_final.pdf</a>	<b>Main Characteristics</b> <b>Application scale:</b> <input type="checkbox"/> Building <input checked="" type="checkbox"/> District <input type="checkbox"/> City <b>Application context:</b> <input checked="" type="checkbox"/> New construction <input type="checkbox"/> Renovation <b>Users target:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Citizens <input type="checkbox"/> Municipalities <input type="checkbox"/> Professionals/Researchers <b>Application phase:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Planning <input type="checkbox"/> Implementation <input type="checkbox"/> Monitoring <b>Case studies:</b> Groningen (NL) e Oulu (FI)	<b>Brief description</b> <b>Scope</b> methodology for PED design aimed at identifying PED concept boundary and proper technical and non-technical actions for cities in their [step-by-step] pathway to energy transition. <b>Structure</b> step-by-step approach, structured in six phases: phase I - city level indicators, analysis of planning tools, analysis of urban components, analysis of energy demand, phase II - definition of the area and definition of district limits, phase III/IV - set of solution, potential barriers and enablers; phase V - calculation of energy balance, phase VI - PED Solution Cards with detailed information on the solutions to be implemented.



ficazione e della domanda energetica, si identifica l'area più adatta e si pianificano le strategie e le azioni da adottare in funzione delle condizioni sociali, economiche e ambientali del contesto in cui si interviene (Alpagut *et al.*, 2019).

### Il Community Transition Pathway e la sua applicazione nel contesto del rione Pilastro e dell'area Le Roveri a Bologna

La zona nord è prevalentemente caratterizzata dal comparto residenziale di Pilastro, mentre l'area sud si costituisce come area a prevalente vocazione industriale e ospita grandi, piccole e medie imprese legate a diversi settori. Il rione Pilastro risulta particolarmente interessante dal punto di vista della comunità e della sua storia. Si tratta di un'importante esperienza di co-

Il rione Pilastro e la zona industriale Le Roveri sono due aree limitrofe della zona periurbana a nord-est della città di Bologna. Considerati insieme hanno un'estensione totale di circa 400 ettari con funzioni miste.

struzione *ex-novo* di un quartiere di *housing* sociale risalente agli anni '60. Oggi l'area appare rilevante per la ricerca per diversi motivi, tra cui la presenza di una comunità variegata (anche dal punto di vista culturale e salariale) che possiede un forte senso di appartenenza con un importante associazionismo, le imprese che necessitano strategie di riduzione dei consumi energetici; e, infine, la presenza di uno dei parchi fotovoltaici più grandi d'Europa, sui tetti di CAAB, caratterizzato da una produzione di 11.350.000 Kw/h di energia primaria. Sull'area sono attive alcune ricerche condotte dall'Università di Bologna, Dipartimento di Architettura, in partnership con altri soggetti dell'area e attori del territorio. Tra queste si cita, in particolare, il progetto GECO – Green Energy Community, finanziato da EIT Climate-KIC (attivo da luglio 2019), che ha l'obiettivo di realizzare una comunità energetica e GRETA - GReen Energy Transition Actions, finanziato dal programma H2020, che si propone di abilitare un ampio e attivo coinvolgimento dei cittadini nei processi di transizione energetica, for-

conducted by Cheng *et al.* (Cheng *et al.*, 2022) proposes to expand the PED Toolbox by developing a tool to map the stakeholders involved in the different stages of the PED implementation process.

- Tools to facilitate decision-making and implementation: these are mainly step-by-step methodologies that accompany the implementation of PEDs with a focus on the planning phase of the intervention. The research carried out by Civiero *et al.* (Civiero *et al.*, 2022, 2021) proposes an innovative simulation model, called PEDRERA, to support PED-based redevelopment actions to be applied in consolidated urban contexts. As part of the Making-City research project, a methodology is developed to accompany cities in the implementation of PEDs. Starting from the study of urban compo-

nents and the analysis of planning tools and energy demand, the most suitable area is identified and the strategies and actions to be taken are planned according to the social, economic and environmental conditions of the context in which the action is taken (Alpagut *et al.*, 2019).

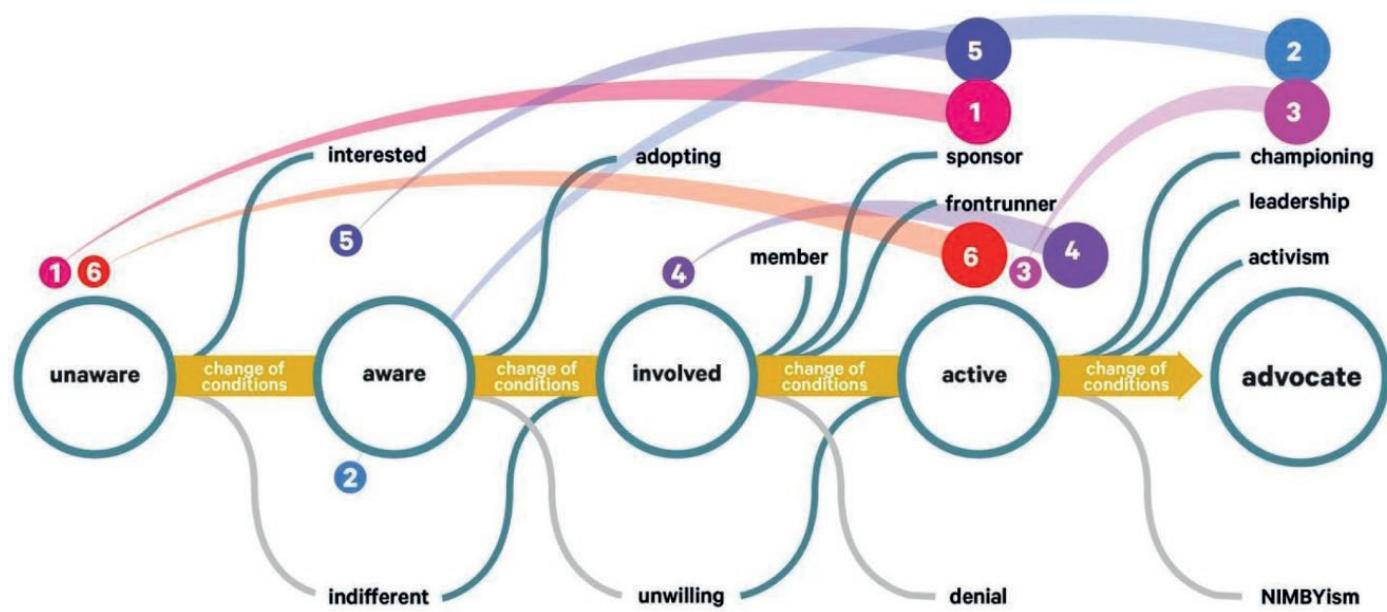
#### The Community Transition Pathway and its application in the context of the Pilastro district and Le Roveri area in Bologna

The Pilastro district and Le Roveri industrial zone are two neighbouring parts of the peri-urban area in the northeast of the city of Bologna. Together they have a total extension of approximately 400 hectares with mixed functions. The northern area is mainly characterised by the residential district of Pilastro, while the southern area is

predominantly industrial and hosts large, small and medium-sized enterprises from different sectors. The Pilastro district is particularly interesting from the perspective of the community and its history. It is an important experience of building a social housing district from scratch dating back to the 1960s. The reasons for its construction were to absorb the substantial migratory flows from southern Italy. Today the area appears significant for research for several reasons, such as the presence of a community (extremely mixed in terms of culture and income) with a strong sense of belonging and associative participation; the presence of industries that need to find solutions to reduce energy consumption; the presence of one of the largest photovoltaic parks in Europe, on the roofs of CAAB, with a production of 11,350,000 kWh of primary energy.

Several research projects are active in the area, conducted by the University of Bologna, Department of Architecture, in partnership with other actors in the area. These include, in particular, the GECO – Green Energy Community project, financed by EIT Climate-KIC (active from July 2019), which aims to create an energy community, and GRETA – GReen Energy Transition Actions, financed by the H2020 programme, which aims to enable a broad and active involvement of citizens in energy transition processes, formulating Community Transition Pathways designed to guide communities towards different levels of awareness regarding energy issues and decarbonisation objectives.

The Community Transition Pathways (CTP) are an innovative tool built by the University of Bologna research group in collaboration with project



mulando dei Percorsi di Transizione (*Community Transition Pathways*) volti a guidare le comunità verso differenti livelli di consapevolezza riguardo le tematiche energetiche e gli obiettivi di decarbonizzazione.

I *Community Transition Pathways* (CTP) sono uno strumento innovativo costruito dal gruppo di ricerca dell'Università di Bologna, in collaborazione con i partner di progetto, e si configurano come una piattaforma di accompagnamento alla comunità nell'identificare e chiarire i propri obiettivi legati alla transizione energetica e alla costituzione di strategie innovative come le comunità energetiche o i gruppi di autoconsumo. Questo strumento è strutturato in diversi componenti, tra cui una guida (*canvas*) alla costruzione di scenari e obiettivi di tran-

sizione e alcuni suggerimenti di condivisione e collaborazione con gli attori locali e la municipalità. Lo strumento è stato testato nel corso di alcuni incontri di co-progettazione. L'utilizzo del canvas, in particolare, ha permesso alla comunità di:

- ridiscutere internamente e insieme ai ricercatori gli obiettivi di miglioramento energetico della comunità di residenti, nel breve, medio e lungo termine;
- inquadrare questi obiettivi all'interno della pianificazione strategica urbana più ampia;
- costruire una gerarchia di azioni, a seconda del livello di fattibilità e rapidità o della necessità di negoziazione con altri attori del territorio. L'immagine (Fig. 2) mostra i diversi livelli di cittadinanza energetica che il CTP supporta.

partners. They are designed as a platform to accompany communities in identifying and clarifying their goals related to energy transition and the establishment of innovative strategies, such as energy communities or self-consumption groups. This tool is structured in several components, including a guide (*canvas*) to building transition scenarios and objectives, and some suggestions for sharing and collaborating with local actors and the municipality. The tool was tested during several co-design meetings. The use of the canvas, in particular, allowed the community to:

- re-discuss, both internally and together with the researchers, the resident community's energy improvement objectives in the short, medium and long term;
- frame these objectives within broader strategic urban planning;

- build a hierarchy of actions, depending on the level of feasibility and speed or the need for negotiation with other actors in the area. The image (Fig. 2) shows the different energy citizenship levels supported by the CTP.

#### Discussion and Conclusions

The increased accessibility of citizen communities to energy issues, offered by enabling technology aggregators such as PEDs and energy communities, represents an opportunity for growth and transition of territories. The research conducted confirms the role of technologies as drivers of energy transition, but only if accompanied by appropriate activities and tools to support local communities. From the projects presented, it emerges, albeit in different ways, how various models and tools for involvement already ex-

ist, but need to be properly used with communities. From the GRETA project, in particular, and the numerous meetings with the community, it is clear that the energy issue is complex, both from a technical, economic and management perspective. However, the CTP presented, coupled with the tutoring activities carried out by the researchers, highlights how a greater degree of understanding on the part of the citizenry is attainable, given a willingness to reciprocally exchange knowledge and collective perspective reasoning. In this direction, participation in the activities of the two projects presented makes it possible to highlight some points of reflection, which are useful to outline a research path on the accessibility of technologies (and of the aggregators that contain them) to accompany the energy transition of communities.

A first point concerns the knowledge and integration of multiple solutions. Energy communities and PEDs can be allies in the transition, with one emphasising the collaborative aspects at the community level, and the other the most important technological innovations. Neither can avoid a situated knowledge of the specific territorial context and its population.

Another point concerns the involvement, awareness and empowerment of citizens in the transformations that affect them directly and indirectly. While on the one hand it is necessary to inspire a sense of responsibility and urgency, on the other hand it is important to understand the real barriers citizens face in implementing energy, economic, cultural and cognitive mitigation strategies. These must find concrete answers from a multidisciplinary transformation support team

## Discussione e Conclusioni

La maggiore accessibilità delle comunità di cittadini a tematiche riguardanti l'energia, offerte da aggregatori di tecnologie abilitanti come i PEDs e le comunità energetiche, rappresenta un'opportunità di crescita e transizione dei territori. Le ricerche condotte confermano il ruolo delle tecnologie come elementi trainanti la transizione energetica, ma solo se accompagnati da opportune attività e strumenti di supporto alle comunità locali. Dai progetti presentati emerge, seppur in maniera diversa, come esistano già diversi modelli e strumenti di coinvolgimento, che tuttavia hanno la necessità di essere correttamente utilizzati con le comunità. Dal progetto GRETA, in particolare, e dai numerosi incontri con la comunità, emerge chiaramente come il tema energetico sia complesso, sia dal punto di vista tecnico, sia economico e gestionale. Tuttavia, il CTP (*Community Transition Pathway*) presentato, unito all'attività di *tutoring* effettuata dai ricercatori, mette in evidenza come un grado maggiore di comprensione da parte della cittadinanza sia raggiungibile, a fronte di una disponibilità di scambio reciproco di conoscenze e di un ragionamento prospettico collettivo. In questa direzione, la partecipazione alle attività dei due progetti presentati consente di evidenziare alcuni spunti di riflessione, utili a trarre un percorso di ricerca sull'accessibilità delle tecnologie (e degli aggregatori che le contengono) per accompagnare la transizione energetica delle comunità.

Un primo punto riguarda la conoscenza e l'integrazione di più soluzioni. Comunità energetiche e PEDs possono essere alleati della transizione, mettendo in rilievo l'uno gli aspetti collaborativi a livello comunitario e l'altro le più importanti innovazioni tecnologiche. Nessuno dei due può esimersi da una co-

noscenza situata del contesto territoriale specifico e della sua popolazione.

Un altro punto riguarda il coinvolgimento, la consapevolezza e la responsabilizzazione dei cittadini nelle trasformazioni che li riguardano direttamente e indirettamente. Se da un lato è necessario infondere un senso di responsabilità e di urgenza, dall'altro è importante comprendere le reali barriere che i cittadini hanno nell'attuare strategie di mitigazione e transizione energetica, economica, culturale, conoscitiva. Queste devono trovare concrete risposte da parte di un gruppo multidisciplinare di supporto alla trasformazione (agenzie di accompagnamento energetico, staff tecnico delle amministrazioni, alleanze con le università).

Ultimo punto riguarda l'urgenza di un'implementazione efficace di interventi, anche in forma di azioni-pilota. Sperimentazioni in scala micro, veloci e reversibili, consentono di valutare e osservare l'efficacia di interventi, senza richiedere investimenti ingenti o tecnologie complesse. Queste, tuttavia, necessitano dell'utilizzo di strumenti gestionali e di un *framework* condiviso tra tutti gli attori.

Purlontano dal considerarsi esaustivo, il contributo mette in luce alcuni elementi emersi dalle ricerche condotte, e, in particolare, l'importanza degli aggregatori di tecnologie abilitanti, come le comunità energetiche e i PEDs. La ricerca sottolinea come questi due approcci debbano lavorare in maniera sinergica, per poter essere considerati come alleati nel percorso di transizione.

Le future applicazioni di questi punti di attenzione, nei progetti di ricerca in corso sull'area bolognese, potranno fornire ulteriori sviluppi e risultati di discussione più approfonditi e basati su un maggior numero di dati.

(energy support agencies, technical staff of administrations, alliances with universities).

A final point concerns the urgency of effective implementation of interventions, also in the form of pilot actions. Micro-scale, fast, reversible experiments make it possible to evaluate and observe the effectiveness of interventions, without requiring large investments or complex technologies. These, however, require the use of management tools and a framework shared by all actors.

Despite being far from exhaustive, the contribution has highlighted a number of elements that have emerged from the research conducted to date. The originality mainly lies in linking up enabling technology aggregators, such as energy communities and PEDs. The research emphasises how these two approaches must work synergistically

in order to be considered allies in the transition path.

Future applications of these focus points in ongoing research projects in the Bologna area may provide further developments and more in-depth discussion results based on more data.

## REFERENCES

- Ahlers, D., Driscoll, P., Wibe, H., Wyckmans, A. (2019), "Co-Creation of Positive Energy Blocks", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 352, 012060.
- Alpagut, B., Akyürek, Ö., Mitre, E.M. (2019), "Positive Energy Districts Methodology and Its Replication Potential", *Proceedings 20*, 8, available at: <https://doi.org/10.3390/proceedings2019020008>.
- Atelier project (2022), PED Learning Community Platform [WWW Document], available at: <https://www.pedlearning.eu/home> (accessed 9.2.22).
- Beauchampet, I., Walsh, B. (2021), "Energy citizenship in the Netherlands: The complexities of public engagement in a large-scale energy transition", *Energy Research & Social Science*, Vol. 76, 102056.
- Bossi, S., Gollner, C., Theierling, S. (2020), "Towards 100 Positive Energy Districts in Europe: Preliminary Data Analysis of 61 European Cases", *Energies*, Vol. 13, 6083.
- Boulanger, S.O.M., Massari, M., Longo, D., Turillazzi, B., Nucci, C.A. (2021), "Designing Collaborative Energy Communities: A European Overview", *Energies*, Vol. 14, 8226.
- Cheng, C., Albert-Seifried, V., Aelenei, L., Vandevyvere, H., Seco, O., Nuria Sánchez, M., Hukkalainen, M. (2022), "A Systematic Approach Towards Mapping Stakeholders in Different Phases of PED Development-Extending the PED Toolbox", in: Littlewood, J.R., Howlett, R.J., Jain, L.C. (Eds.), Springer, pp. 447-463.
- Civiero, P., Pascual, J., Arcas Abella, J., Bilbao Figuero, A., Salom, J., (2021), "PEDRERA. Positive Energy District Renovation Model for Large Scale Actions", *Energies*, Vol. 14, 2833.
- Civiero, P., Pascual, J., Arcas Abella, J., Salom, J. (2022), "Innovative PEDRE-RA Model Tool Boosting Sustainable and Feasible Renovation Programs at District Scale in Spain", *Sustainability* Vol. 14, 9672.
- Devine-Wright, P. (2006), "Energy Citizenship: Psychological Aspects of Evolution in Sustainable Energy Technologies", in *Governing Technology for Sustainability*, Routledge.
- Devine-Wright, P. (2004), "Towards zero-carbon: Citizenship, responsibility and the public acceptability of sustainable energy technologies", *Proceedings of Conference C81 of the Solar Energy Society, UK section of the International Solar Energy Society*, pp. 51-62.
- European Commission (2019a), Orientations towards the first Strategic Plan for Horizon Europe. Directorate Research and Innovation.
- European Commission (2019b), A European Green Deal, European Commission, available at: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (accessed 7.20.22).
- IPCC (2022a), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press. ed. Cambridge.
- IPCC (2022b), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- JPI Urban Europe (2020), *White Paper on PED Reference Framework for Positive Energy Districts and Neighbourhoods*.
- Lennon, B., Dunphy, N., Gaffney, C., Revez, A., Mullally, G., O'Connor, P. (2020), "Citizen or consumer? Reconsidering energy citizenship", *Journal of Environmental Policy & Planning* 22, Vol. 184-197.
- Mee, A., Lyes, M., Crowe, P. (2021), "Energy Urbanity and Active Citizen Participation", *Energies*. Vol. 14, 6515.
- Olivadese, R., Alpagut, B., Revilla, B.P., Brouwer, J., Georgiadou, V., Woestenberg, A., van Wees, M. (2021), "Towards Energy Citizenship for a Just and Inclusive Transition: Lessons Learned on Collaborative Approach of Positive Energy Districts from the EU Horizon2020 Smart Cities and Communities Projects", *Proceedings 65*, 20.
- Rathnayaka, A.J.D., Potdar, V.M., Hussain, O., Dillon, T. (2011), "Identifying prosumer's energy sharing behaviours for forming optimal prosumer-communities", *International Conference on Cloud and Service Computing*, International Conference on Cloud and Service Computing, pp. 199-206.
- Sareen, S., Albert-Seifried, V., Aelenei, L., Reda, F., Etminan, G., Andreucci, M.-B., Kuzmic, M., Maas, N., Seco, O., Civiero, P., Gohari, S., Hukkalainen, M., Neumann, H.M., (2022), "Ten questions concerning positive energy districts", *Building and Environment*, Vol. 216, 109017.
- Schlindwein, L., Montalvo, C. (2022), *Accounting for heterogenous behaviours within transformative policy-making: the case of Energy Citizenship*.
- Schot, J., Kanger, L., Verbong, G. (2016), "The roles of users in shaping transitions to new energy systems", *Nature Energy*, Vol. 1, pp. 1-7.
- SET-Plan Working Group 3.2, (2018), "Europe to become a global role model in integrated, innovative solutions for the planning, deployment, and replication of Positive Energy Districts", SET-Plan Action No 3.2.
- Sovacool, B.K., Turnheim, B., Martiskainen, M., Brown, D., Kivimaa, P. (2020), "Guides or gatekeepers? Incumbent-oriented transition intermediaries in a low-carbon era", *Energy Research & Social Science*, Vol. 66, 101490.
- Turci, G., Alpagut, B., Civiero, P., Kuzmic, M., Pagliula, S., Massa, G., Albert-Seifried, V., Seco, O., Soutullo, S. (2022), "A Comprehensive PED-Database for Mapping and Comparing Positive Energy Districts Experiences at European Level", *Sustainability*, Vol. 14, 427.
- Wahlund, M., Palm, J. (2022), "The role of energy democracy and energy citizenship for participatory energy transitions: A comprehensive review", *Energy Research & Social Science*, Vol. 87, 102482.
- Walker, G., Devine-Wright, P. (2008), "Community renewable energy: What should it mean?", *Energy Policy*, Vol. 36, 497-500.

# Design by data. Dalle interfacce alle architetture responsive

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

Attilio Nebuloni, <https://orcid.org/0000-0002-9552-7002>

Giorgio Buratti, <https://orcid.org/0000-0002-6882-0844>

Dipartimento di Design, Politecnico di Milano, Italia

SAGGI E PUNTI  
DI VISTA/  
ESSAYS AND  
VIEWPOINT

attilio.nebuloni@polimi.it  
giorgio.buratti@polimi.it

**Abstract.** Dall'avvento della rivoluzione digitale in architettura, e ancor più con l'emergere di una nuova generazione di tecnologie abilitanti strutturate sulle interfacce digitali, la dimensione interattivo-relazionale ha assunto centralità nell'agenda progettuale. Significativa è la sperimentazione sulle morfologie responsive, emergenti dalla sinergia tra dati e progetto, i cui artefatti marcano un ritorno al reale che incorpora la fisicità nel processo progettuale e sintetizzano la capacità di tali tecnologie informatiche di discriminare, processare e interpretare dinamicamente una eterogeneità di dati potenziali derivanti dal contesto.

**Parole chiave:** Interfacce; Architettura responsiva; Computational design; Design by data.

## Introduzione

Dopo una fase iniziale di sperimentazione sulle forme, seguita da una seconda più attenta agli aspetti relazionali ed algoritmici, oggi la progettazione digitale si caratterizza principalmente per due tendenze marcatamente diverse: la fabbricazione digitale di artefatti “intelligenti”, da un lato, la computazione algoritmica e la gestione dei cosiddetti *big data*, dall'altro. Con un comune denominatore: l'interazione con il contesto favorita dal ruolo abilitante delle tecnologie digitali nel definire il “comportamento” della costruzione e, in particolare, le piattaforme e le interfacce capaci di tradurre i dati in comunicazione. Questo processo si inserisce lungo una linea descrittiva del progetto (Carpo, 2017a) dove, a prescindere dallo strumento utilizzato – analogico o digitale che sia – attraverso gli algoritmi i progettisti «scrivono e riscrivono senza sosta i loro testi, registri e documenti, lasciando tracce e modificando segni senza sosta su supporti sempre diversi e collegati tra loro da reti fittissime» (Cabitzza, 2021). Significative, in tal senso, sono le sperimentazioni sulle morfologie responsive, qui intese come quei sistemi capaci

di modificare aspetti, o parti, della propria struttura in relazione al mutare di specifiche condizioni ambientali, dove centrale è il rapporto che si viene a creare tra i parametri, ossia gli elementi che contengono dati “grezzi”, ancora non definiti in termini di forma o scala, e le istruzioni che generano azioni e risultati. Da paradigmi meccanici ad altri biologici, attenti ai modi di organizzarsi della natura, emerge un'architettura in cui la tecnologia combina aspetti pragmatici e prestazionali ad altri estetici e concettuali, che riguardano il suo rapporto con il contesto – ambiente e persone.

## Design by data

Da sempre l'architettura si è avvalsa dei dati, dal *concept* alla costruzione, passando per le fasi intermedie di revisione e implementazione del progetto. E ciò secondo una relazione che la inquadra come disciplina poietica, dove lo scopo dei dati non è semplicemente quello di descrivere o raccontare, ma di progettare o modificare il proprio contesto di riferimento, in un reciproco dialogo tra architettura e ambiente, espressione di una rinnovata tensione tra la dimensione naturale e artificiale. Tale relazione trova forma in tre principali approcci, significativamente diversi tra loro, che si definiscono osservando il flusso dei dati: da una condizione di staticità e indipendenza tra i due domini, ad altra più dinamica e interattiva dove la variabilità dei parametri è elemento di valore per esplorare nuove ipotesi progettuali. Essi sono, nello specifico, il *design 'from' data*, il *design 'with' data* e il *design 'by' data* (Speed, 2016):

- il *design 'from' data* attiene a quei sistemi progettuali interamente guidati dal progettista, che individua, seleziona e

## Design by data. From interfaces to responsive architectures

**Abstract.** Since the rise of the digital revolution in architecture, and even more so with the emergence of a new generation of enabling technologies structured on digital interfaces, the interactive-relational dimension has become central to the design agenda. The experimentation on responsive morphologies that emerge from the synergy between data and design, and whose artefacts mark a return to the real world that incorporates physicality into the design process is significant. In addition, they represent a synthesis of the ability of such digital technologies to dynamically discriminate, process, and interpret heterogeneous potential data derived from the context.

**Keywords:** Interfaces; Responsive architecture; Computational design; Design by data.

## Foreword

After an early phase of experimentation on forms followed by a second one more attentive to relational and algorithmic aspects, digital design is now mainly characterised by two markedly different tendencies, precisely the digital fabrication of “smart” artefacts, on the one hand, and the algorithmic computation and management of so-called big data, on the other. A common denominator is the interaction with the context fostered by the enabling role of digital technologies in defining the “behaviour” of construction and, in particular, the platforms and interfaces capable of translating data into communication. This process fits along a descriptive line of design (Carpo, 2017a), where regardless of the tool used-analogue or digital-through algorithms, designers «relentlessly

write and rewrite their texts, records and documents, leaving traces and modifying signs relentlessly on ever-changing media connected by dense networks» (Cabitzza, 2021). Relevant, in this sense, are the experiments on responsive morphologies, understood here as systems capable of modifying aspects, or parts, of their structure to changing specific environmental conditions, where a central role is played by the relationship created between the parameters, i.e. the elements that contain “raw” data, as yet undefined in terms of shape or scale, and the instructions, which generate actions and results. From mechanical paradigms to biological ones, concerned with nature's ways of organising itself, there emerges an architecture in which technology combines pragmatic and performance aspects with aesthetic and conceptual ones, which

- si riferisce ad *input* ricavati dalla misurazione diretta di elementi noti. In tale approccio il dato è una premessa al progetto.
- il *design 'with' data* si caratterizza per un processo che nelle varie fasi è ancora ampiamente determinato dal progettista, anche se nel progetto si affianca il flusso dei dati provenienti da livelli intermedi di verifica e revisione di processi e prodotti. Il ruolo dei dati si gioca in questo caso tra le premesse e le fasi di implementazione del progetto.
- il *design 'by' data*, infine, si caratterizza per *pattern* progettuali aperti (non definiti nella loro fisicità), che promuovono l'emergere di nuove morfologie quale sintesi delle possibili relazioni tra persone, computer, oggetti e ambienti. Il progetto si struttura in questo caso su variabili dinamiche, in considerazione della sinergia tra la sovrastruttura informativa digitale e i processi di stratificazione che legano un'architettura al suo contesto nel corso del tempo – la variabilità è ciò che ne marca il carattere.

In parallelo alla questione del flusso dei dati, altrettanto significativo è l'aspetto "dimensionale" degli stessi. Per secoli, l'evoluzione culturale e scientifica è stata costruita attraverso una logica di ricerca ed elaborazione di "piccoli" dati<sup>1</sup>, sino a che, ed in seguito all'avanzamento delle tecnologie informatiche che ha contraddistinto il nuovo millennio, il processo di creazione, raccolta e trasmissione delle informazioni è diventato così economico, e l'insieme di dati talmente grande<sup>2</sup>, da richiedere nuovi strumenti e metodologie capaci di processare le informazioni: è l'avvento della cosiddetta era dei *Big Data*. Per la prima volta nella storia, l'umanità dispone di più dati di quanti riesca a gestirne. Ne consegue che le tradizionali strutture tassonomiche di ordinamento delle informazioni utilizzate per

gestire la conoscenza<sup>3</sup> applicate in questo contesto siano meno efficienti del dato non ordinato. Questo avviene perché i computer non usano classificazioni per trovare e recuperare dati e informazioni: «non ordinano, ma cercano» (Carpo, 2017b). L'elaboratore non trova significati ma, diversamente dagli esseri umani, può utilizzare la crescente mole di informazioni non ordinate definendo un nuovo modo di produrre conoscenza grazie all'identificazione di regolarità (*pattern*) all'interno dei dati elaborati. In luogo di leggi universali che spieghino il maggior numero possibile di eventi simili, la ricerca *data-driven* è così capace di indagare insiemi sempre più piccoli, sino a gestire il caso particolare. Un esempio pionieristico della traduzione, in termini computazionali, di un processo di progettazione euristica funzionalmente equivalente all'utilizzo dei *big data*, è il progetto sperimentale del padiglione ICD/ITKE 2012 (Figg. 1, 2). I ricercatori hanno progettato e costruito una struttura di soli quattro millimetri, capace di alte prestazioni strutturali, sfruttando un innovativo processo di fabbricazione robotica basato sull'avvolgimento di filamenti polimerici arricchiti con fibra di carbonio e vetro. Lo studio che ha portato alla costruzione di tale struttura ha considerato la complessità geometrica, nonché la densità e la direzione di ciascun fascio di fibre costituenti i tasselli del padiglione, definendo un processo progettuale basato su algoritmi iterativi che ha permesso di confrontare e valutare rapidamente una mole di dati ingestibili con i tradizionali metodi di progettazione. Questo procedimento ha permesso di organizzare la complessità associata ai *big data*, allineandola a geometrie e processi di lavorazione per i quali abbiamo soluzioni numeriche che prefigurano modelli gestibili (Buratti, 2017).

relate to its relationship with the context – environment and people.

#### Design by data

Since the beginning, architecture has always used data, from concept to construction, through the intermediate stages of design review and implementation. Moreover, this is according to a relationship that frames it as a poietic discipline, where the aim of data is not simply to describe, with no real design intent, but to design, or modify, its context of reference, in a reciprocal dialogue between architecture and the environment, expressing a renewed tension between natural and artificial dimensions. This relationship finds shape in three main approaches, significantly different from each other, which are defined by observing the flow of data: from a condition of static and independence between the two

domains to another more dynamic and interactive one where the variability of the parameters is a valuable element to explore new design hypotheses. They are, specifically, design 'from' data, design 'with' data, and design 'by' data (Speed, 2016):

- design 'from' data pertains to those design systems that are entirely driven by the designer, who identifies, selects and draws on inputs derived from direct measurement of known elements. In such an approach, data is a premise of design.
- design 'with' data is characterised by a process still largely determined by the designer at the various stages. However, the flow of data from intermediate levels of process/product verification and review is joined in the design. The role of data is played here between the premises and the implementation phases of the project.

- lastly, design 'by' data is characterised by open design patterns (not defined in their physicality) that foster the emergence of new morphologies as a synthesis of the possible relationships between people, computers, objects and environments. The design is based, in this case, on dynamic variables because of the synergy between the digital information superstructure and the layering processes that bind architecture to its context over time – the variability is what marks its character.

Along with the issue of data flow, equally significant is the "dimensional" aspect of data. For centuries, cultural and scientific evolution has been built through a logic of research and processing of "small" data<sup>1</sup>, until and as a result of the advancement of information technology that has marked the

new millennium, the process of creating, collecting and transmitting information has become so economical, and the set of data so large<sup>2</sup> that it requires new tools and methodologies able to process the information: this is the advent of the so-called Big Data era. For the first time in history, humanity has more data than it can handle. It follows that the traditional taxonomic information sorting structures used to manage knowledge<sup>3</sup> applied in this context are less efficient than unsorted data. This is because computers do not use classifications to find and recover data and information. They «do not sort, they search» (Carpo, 2017b). The computer does not find meanings but, unlike humans, can use the growing amount of unsorted information to define a new way of producing knowledge through the identification of regularities (*patterns*) within the processed data. In

01 | Padiglione ICD/ITKE 2012. Ad un primo layout geometrico per lo studio del comportamento strutturale (FEA) è seguito un processo algoritmico iterativo di modifica della geometria del guscio e della disposizione interna delle fibre, che ha identificato i **cluster** migliori ed eliminato quelli inefficienti, sino al raggiungimento della morfologia ottimale

ICD/ITKE 2012 Pavilion. An initial geometric layout for studying structural behaviour (FEA) was followed by an iterative algorithmic process of modifying the shell geometry and internal fibre arrangement that identified the best clusters, and eliminated inefficient ones, until the optimal morphology was achieved

- 02| Padiglione ICD/ITKE 2012. La soluzione formale è il risultato del processo computazionale che collega il modello digitale e le simulazioni agli elementi finiti con il controllo della fabbricazione robotizzata del filamento di fibra di vetro (chiaro) e carbonio (scuro)
- ICD/ITKE 2012 Pavilion. The formal solution resulted from the computational process linking the digital model and finite element simulations with the control of robotic fabrication of the glass (light) and carbon (dark) fibre filament



spite of universal laws that explain as many similar events as possible, data-driven research is thus capable of investigating smaller and smaller sets until the particular case is handled. A pio-

neering example of the computational translation of a heuristic design process functionally equivalent to the use of big data is the experimental design of the 2012 ICD/ITKE Pavilion (Figs. 1,

2). Researchers designed and built a structure of only four millimetres, capable of high structural performance, by exploiting an innovative robotic fabrication process based on winding

polymer filaments enriched with carbon fibre and glass. The study that led to the construction of such a structure regarded the geometric complexity, as well as the density and direction of each

Se la “potenza” computazionale rappresenta l’impulso della sperimentazione (strumentale e per discretizzare l’informazione), determinante è la capacità intellettiva di “leggere progettualmente” tale struttura di dati. Riconoscere l’importanza del ruolo delle tecnologie informatiche, infatti, non implica il determinismo tecnologico e non afferma che i processi *data driven* debbano necessariamente guidare tutti i processi cognitivi. Per aprire nuove vie interpretative e costruire nuovi *pattern* di spazialità è necessario, quindi, elaborare metodi di indagine diversi che valorizzino un utilizzo consapevole dei nuovi strumenti, senza trascurare le implicazioni epistemologiche: se è vero che grazie alla progettazione computazionale è possibile gestire strutture di notevole complessità, è altrettanto vero che il risultato deriva da una mole di informazioni superiore alla capacità di discrezione umana e trascende la logica dei piccoli dati di causalità e determinismo studiati nel tempo per semplificare il mondo fisico e tradurlo in modelli “a misura d’uomo”.

### Artefatti responsivi e il ruolo delle interfacce digitali

to inteso sia come artefatto oggettuale sia come artefatto comunicativo) e scopo dell’azione». L’interfaccia è quindi quel dispositivo enunciativo che definisce la qualità dell’interazione tra utente e artefatto, spazio d’azione in cui utente e oggetto si ridefiniscono vicendevolmente. Tale definizione è estensibile anche alle tecnologie digitali che connettono ambienti differenti ed il cui scopo può essere sia quello di migliorare l’applicazione di

Bonsiepe (1995) definisce l’interfaccia come: «uno spazio in cui si articola l’interazione tra corpo umano, utensile (artefat-

interpretive directions and build new patterns of spatiality, it is necessary to develop different methods of exploration that enhance conscious use of the new tools, without forgetting the epistemological implications. While it is true that thanks to computational design it is possible to manage structures of considerable complexity, it is also true that the outcome derives from a mass of information, which exceeds the capacity for human discretion and transcends the rationale of small data of causality and determinism that have been studied over time to simplify the physical world and translate them into models on a “human scale”.

#### Responsive artefacts and the role of digital interfaces

Bonsiepe (1995) defines interface as: «a space in which the interaction between human body, tool (an artefact

oggetti o strumenti esistenti sia quello di aumentare aspetti, processi o caratteristiche dell’ambiente stesso, per modificarlo e così creare nuove realtà che l’utente è in grado di sperimentare/abitare. Quest’ultime sono quindi interfacce tecnologiche non meramente funzionali, ma in grado di abilitare un dialogo tra ambiti spesso eterogenei, promuovendo lo sviluppo di processi e traiettorie progettuali non possibili con gli strumenti (ed i riferimenti) classici dell’architettura. A loro volta, ed in ragione del livello in cui si collocano nel progetto, possono essere:

- (a monte) interfacce che operano sulla scrittura per abilitare il dialogo tra ambienti differenti che non condividono un comune linguaggio – sono interfacce che lavorano sulla programmazione per trasferire, ri-mappandoli, dei valori in *input* ancora in cerca di un’interpretazione progettuale;
- (a valle) interfacce che operano sugli oggetti per abilitare il dialogo tra sistemi spaziali e costruttivi – sono principalmente interfacce abilitate al controllo del comportamento (azione) di una morfologia.

Dati e pannelli di controllo appartengono a questa seconda categoria e la loro applicazione nel progetto permette l’emergere di morfologie capaci di “governare” progettualmente la variabilità e, quindi, di potersi reconfigurare, o adattare, in modo responsivo, in ragione del cambiamento di specifici aspetti ambientali (ad esempio valori di illuminazione, umidità o rumore assunti a parametri di controllo del sistema<sup>4</sup>) o necessità degli utenti (come prossimità, densità o attività dello spazio<sup>5</sup>). Centrale è di conseguenza il ruolo assunto dai cosiddetti componenti responsivi, oggetti tecnologici “intelligenti” della costruzione ed espressione dei cambiamenti indotti in architettura dall’introduzione della robotica. La natura bidirezionale dei processi

understood both as object artefact and communicative artefact) and purpose of action is articulated». The interface is thus that enunciative device, which defines the quality of the interaction between user and artefact, a space of action in which user and object redefine each other. This definition is also applicable to digital technologies that connect different environments, whose purpose can be either to enhance the application of existing objects or tools or to augment aspects, processes, or features of the environment itself, to modify it and thus create new realities that users can experience/inhabit. The latter are thus technological interfaces that are not merely functional but able to activate a dialogue between often heterogeneous domains, resulting in the development of design processes and trajectories, which are not possible with the classical tools (and references) of architecture. In turn, and because of the level at which they are placed in the project, they can be:

- (from the top) interfaces that work on writing to enable dialogue between different environments that do not share a common language – they are interfaces that work on programming to transfer, in remapping, input values still seeking design interpretation.
- (from the bottom) interfaces that operate on objects to enable dialogue between spatial and constructive systems – these are primarily interfaces enabled to control a morphology’s behaviour (action).

Data and control panels belong to this second category, and their application in the project allows the emergence of morphologies able to “rule” variability by design and, therefore, to be able to responsively reconfigure, or adapt, due

robotici determina, infatti, una mutazione profonda del ruolo assunto dalle interfacce digitali, che dall'essere strumenti prescrittivi nel determinare oggetti statici, diventano sistemi relazionali strutturati su aspetti dinamici, frutto dell'interazione con molteplici parametri, sia endogeni che esogeni (Rossi, 2017). Contemporaneamente punto di incontro tra aspetti compositivi e tecnologici, da un lato, e tra le dimensioni globale e locale dell'architettura, dall'altro, la potenzialità di forma dei componenti risulta così in un'estetica della mutazione fondata sulla capacità di interfacciarsi e dialogare in modo dinamico con il contesto.

In luogo di una tecnologia "produttiva" capace di replicare forme non biologiche di intelligenza naturale, i componenti responsivi sono tecnologie di tipo "riproduttivo", ovvero attente a ripetere, nei loro movimenti semplici, i risultati raggiunti dal comportamento intelligente di forme naturali (es. risolvere problemi o svolgere positivamente dei compiti). Ciò è possibile, in analogia a quanto afferma Floridi (2017) in merito all'Intelligenza Artificiale, solo considerando i componenti stessi come interfacce che basano la propria efficienza sulla costruzione attorno ad essi di un ambiente *ad hoc*, o "involtro", ritagliato sulle loro specifiche capacità. Così l'autore definisce il concetto: «Si pensi, nella robotica industriale, a un robot che vernicia un componente di un veicolo in una fabbrica. Lo spazio tridimensionale che definisce i confini entro i quali un tale robot può funzionare con successo si chiama involucro del robot. Alcune delle nostre tecnologie, come le lavastoviglie o le lavatrici, assolvono ai loro compiti perché i loro ambienti sono involucri strutturati (avvolti) attorno alle capacità elementari del robot al loro interno. (...) È l'ambiente che è progettato per essere com-

patibile con i robot, non il contrario. Pertanto, non costruiamo droidi per lavare i piatti nel lavandino o guidare la macchina, insegnandogli a fare esattamente ciò che faremmo noi, per sostituirci. Al contrario, avvolgiamo microambienti attorno a semplici robot per adattarli e sfruttare le loro capacità limitate e arrivare comunque al risultato desiderato. (Tutto ciò – *ndr.*) ha iniziato a pervadere tutti gli aspetti della realtà e sta accadendo quotidianamente ovunque, in casa, in piazza e in ufficio. Io stesso ho modificato il giardino per assicurarmi che il robot potesse tagliare l'erba senza incastrarsi in un angolo o uscire dal perimetro o bloccarsi in un'area scoscesa (*ibid*).».

In questo luogo i componenti funzionano e sono capaci di rispondere con un comportamento programmato apparentemente semplice agli obiettivi definiti dal progetto nel suo insieme. È il progettista a deciderne la forma ed i parametri rispetto a scelte e vincoli progettuali, costruendo attorno ad essi caratteristiche e confini dello spazio tridimensionale entro cui poter funzionare con successo, ciò anche modificando in modo significativo l'impianto spaziale dell'architettura. Per la loro esplorazione molti *software* integrano interfacce o *plug-ins*<sup>6</sup> che, con opportuni linguaggi di programmazione, consentono la personalizzazione dell'ambiente di modellazione e della definizione di algoritmi e dati di controllo (Nebuloni, 2020). Alcune di queste funzionalità, inoltre, consentono l'interoperabilità tra i diversi ambienti e piattaforme digitali, essenziale per l'integrazione nel processo di *input* esterni, come ad esempio connettere in modo bidirezionale un modellatore algoritmico ad un microcontrollore al fine di processare dati provenienti da sensori e simulare il comportamento fisico di un artefatto, sia in modo virtuale che reale. Accogliere una tale struttura di componenti

to changes in specific environmental aspects (e.g. lighting, humidity or noise values assumed to be system control parameters<sup>4</sup>) or user needs (as proximity, density or activity of the space<sup>5</sup>). As a result, the so-called responsive components assume a central role. They are "intelligent" technological objects of construction, and an expression of the changes induced in architecture by the introduction of robotics. In fact, the bi-directional nature of robotic processes brings about a profound mutation in the role assumed by digital interfaces, which switch from being prescriptive tools in determining static objects, to relational systems structured on dynamic aspects, the result of interaction with a wide range of parameters, both internal and external (Rossi, 2017). Simultaneously a meeting point between compositional and technological aspects, on the one hand, and between

the global and local dimensions of architecture, on the other, whose potentiality of form of the components thus results in an aesthetic of mutation based on the ability to interface and dialogue with the context dynamically. Instead of a "productive" technology capable of replicating non-biological forms of natural intelligence, responsive components are "reproductive" technologies, which means they are careful to repeat in their simple movements the results achieved by the intelligent behaviour of natural forms (e.g. solving problems or performing tasks positively). This aspect is possible, similarly to what Floridi (2017) states about Artificial Intelligence, only by considering the components themselves as interfaces that base their efficiency on the construction around them of an *ad hoc* environment, or "envelope", tailored to their specific ca-

pabilities. The author defines the concept as follows:

«Think, in industrial robotics, of a robot painting a vehicle component in a factory. The three-dimensional space that defines the boundaries within which such a robot can operate successfully is called the robot envelope. Some of our technologies, such as dishwashers or washing machines, accomplish their tasks because their environments are envelopes structured (wrapped) around the robot's elemental capabilities. (...) The environment is designed to be compatible with robots, not the other way around. Therefore, we do not build droids to wash dishes in the sink or drive the car, teaching them to do right what we would do to replace us. Instead, we wrap microenvironments around simple robots to adapt them, take advantage of their limited capabilities, and still arrive at

the desired result. (*This – Eds.*) has begun to permeate all aspects of reality and is happening daily everywhere, at home, in the square and in the office. I modified the garden to ensure the robot could cut the grass without getting stuck in a corner, going outside the perimeter, or getting stuck in a steep area (*ibid*).».

In this place, components function and can respond with seemingly simple programmed behaviour to the objectives defined by design as a whole. The designer decides their form and parameters concerning design choices and constraints, building around them features and boundaries of the three-dimensional space within which they can function successfully, even significantly altering the spatial layout of the architecture. For their exploration, many software integrate interfaces or *plug-ins*<sup>6</sup>, which use suitable program-

03| Al Bahar Towers, Abu Dhabi – Aedas Architects. Gli edifici si caratterizzano per una facciata dinamica popolata da componenti a forma triangolare, il cui comportamento segue una logica algoritmica: i valori di incidenza solare vengono processati da un programma che determina il grado di apertura dei "petali", proteggendo l'interno dalle condizioni ambientali estreme del luogo  
*Al Bahar Towers, Abu Dhabi – Aedas Architects. The buildings are characterized by a dynamic facade populated by triangular-shaped components, whose behaviour follows an algorithmic logic: solar incidence values are processed by a program that determines the degree to which the "petals" are open, protecting the interior from the extreme environmental conditions of the site*

04| Media-TIC Building, Cloud 9, Barcellona – Ruiz Geli. I componenti in ETFE che caratterizzano due facciate dell'edificio si gonfiano in ragione del grado di intensità dell'esposizione solare e creano zone d'ombra che permettono di risparmiare energia. La composizione della facciata e la distribuzione delle attività interne sono state progettate per ottimizzarne il funzionamento  
*Media-TIC Building, Cloud 9, Barcelona – Ruiz Geli. The ETFE components that characterize two facades of the building swell due to the degree of intensity of solar exposure, creating shaded areas that save energy. The composition of the facade and the distribution of internal activities were designed to optimize their operation*

nella costruzione implica, quindi, la creazione di un ecosistema a loro favorevole e ciò spesso trova forma in corrispondenza della superficie esterna dell'architettura, che così diventa strumento di interazione ambientale; in primo luogo, definendo geometricamente tale spazio attraverso la discretizzazione della superficie stessa in moduli base e, successivamente, popolando questi moduli di nuovi artefatti tecnologici (Figg. 3, 4, 5).

### Verso un ritorno al reale

Se lo sviluppo delle interfacce progettuali è avvenuto principalmente all'interno di paradigmi concettuali focalizzati sulla rappresentazione e ancora dominati dalla separazione tra quest'ultima e la costruzione dell'architettura (Rossi, 2017), lo specifico della relazione tra analogico e digitale caratterizzante gli artefatti responsivi marca un ritorno al reale che incorpora tale fisicità già nel processo progettuale. Nel contempo, libera il progettista dal semplice controllo dell'interfaccia grafica di restituzione del progetto, per lavorare (in analogia a quanto avviene con gli oggetti nel paradigma della progettazione OOP, e pensando ai componenti come degli oggetti 'quasi bricks'), alla programmazione ed alla gestione del suo processo. L'apertura e la condivisione delle istruzioni, unitamente alla capacità del progetto stesso di sviluppare, nei componenti, forme di comportamento dinamico, sono le ragioni principali che oggi spostano l'attenzione dei progettisti dalla replicabilità del modello all'elaborazione di procedure e relazioni in grado di abilitarne la costruzione.

Interfaccia tra analogico e digitale, ma anche tra reale e virtuale, centrale nella progettazione è così la costruzione del prototipo di studio, il cui sviluppo sarà principalmente rivolto alla sperimentazione e validazione di un'idea, piuttosto che alla

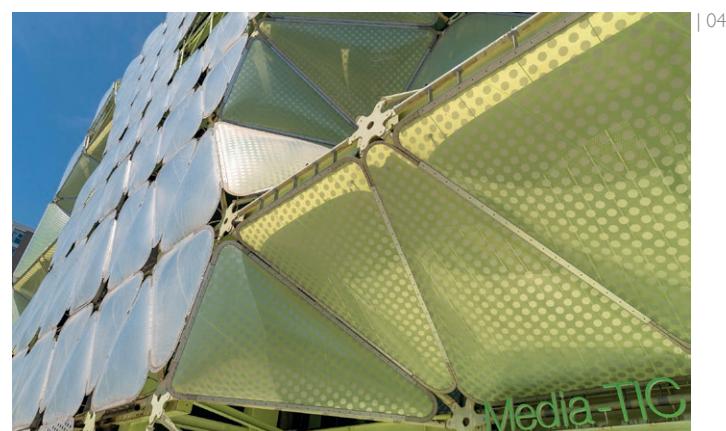
ming languages to customise the modelling environment, define algorithms and control data (Nebuloni, 2020). Some of these functionalities also enable interoperability between different digital environments and platforms. This interoperability is essential for integrating external inputs into the process, such as bi-directionally connecting an algorithmic environment to a microcontroller to process data from sensors and simulate the physical behaviour of a component, both virtually and in real life. Accommodating them in the construction thus implies the creation of an ecosystem that is favourable to them, and this often finds form in the building's envelope, thus becoming an instrument of environmental interaction. The first step is the geometrical definition of that space through discretisation of the surface into basic modules and then the mod-

ules' population with new technological artefacts (Figs. 3, 4, 5).

### Towards a return to the real

If the development of design interfaces has mainly taken place within conceptual paradigms focused on representation, and is still dominated by the division between it and the construction of architecture (Rossi, 2017), the special relationship between analogue and digital characterising responsive artefacts marks a return to the real world that incorporates such physicality already in the design process. Simultaneously, it releases the designer from the simple control of the graphical interface of restitution of the design, to work (in analogy to what happens with objects in the OOP design paradigm and thinking of components as 'almost bricks' objects) on the programming and management of its process. The

produzione dell'oggetto finale; e questo per meglio comprendere le potenzialità del modello digitale e la possibilità della sua traduzione nella costruzione. Allo stesso tempo, per «rendere meno misteriosa la transizione tra intenzioni ed esiti, tra interpretazione del reale e geometrie chiamate a trasformarlo, tra figure e strumenti per la loro manipolazione» (Corbellini, 2013). La realizzazione di un prototipo implica, però, che il progettista si confronti con aspetti non costitutivi dell'architettura, come ad esempio gli attriti, l'elettronica, il peso e le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali in relazione ad ingranaggi, connessioni e cinematics, per trasporre idee e progetti in soluzioni concrete, spesso non standardizzate nei modi della produzione corrente. L'elaborazione analogica in forma di prototipo rappresenta, quindi, il primo spazio di fattibilità del progetto. Inoltre, non spezzando più in fasi distinte la progettazione, ma condividendo un nuovo linguaggio comune basato sulla programmazione e il pensiero digitale, nella ciclicità della relazione tra le dimensioni analogica-digitale-analogica, dal progetto viene così a generarsi un flusso continuo di informazioni che



05| Ada pavilion, Redmond, Washington – Sabin Studio con Microsoft Research. Il padiglione è realizzato dall'aggregazione di componenti tubulari e cellulari in tessuto e fibre fotoluminescenti, capaci di assorbire ed emettere luce. Sensori e telecamere ricavano dati da modelli facciali, voci e suoni, che elaborati da algoritmi di Intelligenza Artificiale rispondono empaticamente al visitatore  
Ada pavilion, Redmond, Washington – Sabin Studio con Microsoft Research. The pavilion is made by of tubular and cellular fabric components and photoluminescent fibres capable of absorbing and emitting light. Sensors and cameras extract data from facial patterns, voices and sounds, which processed by Artificial Intelligence algorithms respond empathetically to the visitor

| 05

interfacciano il momento dell'ideazione a quello dell'elaborazione e costruzione di un'architettura.

In sintesi, la principale forza delle morfologie responsive è quella di ri-ontologizzare la realtà e aprire l'architettura a riferimenti esterni al proprio dominio<sup>7</sup>. La loro sperimentazione, tuttavia, sconta ancora oggi diverse rigidità disciplinari che ne confinano l'accettazione principalmente nella sfera della ricerca, dove queste tecnologie abilitanti di matrice digitale sono consapevolmente tollerate, in particolare, e ancora con le parole di Floridi (2017): «quando ciò non produce conseguenze rilevanti o quando si tratta di una soluzione temporanea nell'attesa di progettare un design migliore».

#### ATTRIBUZIONE

Il testo deriva da un lavoro collettivo. Nell'elaborazione, Giorgio Buratti ha curato in particolare il paragrafo *“Design by data”* e Attilio Nebuloni i paragrafi *“Artefatti responsivi e il ruolo delle interfacce digitali”* e *“Verso un ritorno al reale”*. Il resto del testo è frutto del lavoro condiviso tra i due autori.

#### NOTE

<sup>1</sup> Si pensi, ad esempio, come sino a pochi decenni fa le biblioteche erano ancora essenzialmente l'unico luogo dove reperire informazioni, per lo studio, la professione o lo svago. La disponibilità di informazione e delle relative fonti era legata a supporti fisici, i libri, che caratterizzavano la biblioteca a seconda della natura della raccolta ed alla coerenza interna della stessa. Se le informazioni desiderate non erano disponibili era d'obbligo recarsi in una nuova biblioteca o aspettare la spedizione di un libro, recarsi in loco nel caso di un tomo raro o rinunciare alle informazioni cercate.

<sup>2</sup> Il volume dei dati attualmente impegnati nel mondo è di circa 40 zettabyte/anno e segue un *trend* in continua crescita. Uno zettabyte corrisponde



a  $10^{21}$  byte, circa 180 milioni di volte le informazioni raccolte nelle documentazioni conservate presso la Biblioteca del Congresso di Washington, riconosciuta come la più grande biblioteca esistente con oltre 158 milioni di documenti custoditi.

<sup>3</sup> Ciò è avvenuto, essenzialmente, attraverso processi di estrappolazione e generalizzazione che hanno permesso di raccogliere e trasmettere informazioni, traducendo la realtà in una forma semplificata e ridotta, adatta ai limiti di registrazione e trasmissione dei mezzi di comunicazione disponibili. Dati e informazioni sono stati formalizzati in un modello teorico solitamente regolato da una relazione causa effetto espressa tramite sillogismi, funzioni matematiche o equazioni, con cui è possibile dedurre e prevedere eventi omologhi. La notazione  $y = f(x)$ , ad esempio, descrive le relazioni tra il numero infinito di punti necessari per produrre una linea a tutte le scale possibili: in luogo di un elenco abnormemente lungo di coordinate cartesiane, la notazione alfanumerica elementare consente di ricalcolare le coordinate di tutti i punti che indicizza.

<sup>4</sup> Il programma interpreta i dati ed esprime dei requisiti che permettono di orientare la direzione, la forza e l'azione delle variabili stesse, come ad esempio aprire, chiudere, scorrere, ecc.

<sup>5</sup> In merito alla dimensione comunicativa, e pur nell'invarianza del processo computazionale, a prevalere sono principalmente componenti di luce e suono, in luogo dei più classici cinematismi “meccanici”.

<sup>6</sup> Applicazioni che aggiungono funzionalità avanzate al *software* di base.

<sup>7</sup> Particolare attenzione è in tal senso rivolta al mondo della biologia per l'interesse alle varie forme di comportamento che gli organismi naturali attuano nella relazione con l'ambiente.

openness and sharing of instructions, together with the ability of the design itself to develop, in components, forms of dynamic behaviour, are the main reasons that today shift the attention of designers from the replicability of the model to the development of procedures and relationships that can enable its construction.

As an interface between analogue and digital, as well as between real and virtual, central to design is thus the construction of the study prototype, the development of which will be primarily aimed at the experimentation and validation of an idea, rather than the production of the final object. This is to better understand the potential of the digital model and the possibility of its translation into construction. At the same time: «to make less mysterious the transition between intentions and outcomes, between the interpre-

tation of reality and geometries called to transform it, between figures and tools for their manipulation» (Corbellini, 2013). The creation of a prototype, however, requires the designer to deal with aspects that are not constitutive of architecture, such as friction, electronics weight and the physical-mechanical characteristics of materials concerning gears, connections and kinematics, in order to translate ideas and designs into concrete solutions, which are often not standardised in the ways of mainstream production. Thus, analogue processing in prototype form represents the first space of project feasibility. Moreover, no longer breaking design into distinct phases but sharing a new common language based on programming and digital thinking generates in the cyclic nature of the relationship between the analogue-digital-analogue dimensions, a continuous flow of information that

interfaces the moment of ideation to the moment of processing and construction of an architecture.

In summary, the main strength of responsive morphologies is to re-ontologise reality and open architecture to references outside its domain<sup>7</sup>. However, their experimentation today still suffers from several disciplinary rigidities that confine their acceptance mainly to the sphere of research, where these enabling technologies of the digital matrix are consciously tolerated, in particular, and again in the words of Floridi (2017): «when this does not produce relevant consequences or when it is a temporary solution while waiting to design a better design».

#### ATTRIBUTION

The paper is the result of a collective work. In its editing, Giorgio Buratti has

especially edited the paragraph *“Design by data”* and Attilio Nebuloni the paragraphs *“Responsive artefacts and the role of digital interfaces”* and *“Towards a return to the real”*. The other parts of the text are the result of shared work between the two authors.

#### NOTES

<sup>1</sup> Consider, for example, how until a few decades ago libraries were still essentially the only place to find information, whether for study, profession or recreation. The availability of information and its sources was tied to physical media, books, which characterised the library according to the nature of the collection and its internal consistency. If the desired information was not available, it was a must to travel to a new library or wait for a book to be shipped, to travel locally in the case of a rare tome, or to forgo the information sought.

## REFERENCES

- Bonsiepe, G. (1995), *Dallogetto all'interfaccia: mutazioni del design*, Feltrinelli, Milano.
- Buratti, G. (2017), "Il disegno computazionale. La forma come organizzazione", in Nebuloni, A. and Rossi, A. (Eds.), *Codice e Progetto. Il computational design tra architettura, design, territorio, rappresentazione, strumenti, materiali e nuove tecnologie*. Mimesis Edizioni, Milano.
- Cabitza, F. (2021), "Deus in machina? L'uso umano delle nuove macchine, tra dipendenza e responsabilità", in Floridi, L. and Cabitza, F. (Eds.), *Intelligenza Artificiale. L'uso delle nuove macchine*, Bompiani, Milano.
- Carpo, M. (2017a), "Building with geometry, drawing with numbers", in Goodhouse, A. (Ed.), *When is the digital in architecture?*, Sternberg, Berlin.
- Carpo, M. (2017b), *The second digital turn. Design Beyond Intelligence*, the MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Corbellini, G. (2013), "Ultimo tango a Zagarol", in Corbellini, G. and Mazzoni, C. (Eds.), *Parametrico nostrano*, Lettera ventidue, Siracusa.
- Floridi, L. (2017), *La quarta rivoluzione. Come l'infosfera sta trasformando il mondo*, Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Floridi, L. (2021), "Agere sine Intelligere. L'intelligenza artificiale come nuova forma di agire e i suoi problemi etici", in Floridi, L. and Cabitza, F. (Eds.), *Intelligenza Artificiale. L'uso delle nuove macchine*, Bompiani, Milano.
- Frazer, J. (1995), *An Evolutionary Architecture*. London, AA Press.
- Nebuloni, A. and Vignati, G. (2020). "Design data-driven e movimento. Un approccio metodologico alla progettazione", in Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S. and Tucci, F. (Eds.), *Design in the Digital Age. Technology, Nature, Culture*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna.
- Rossi, A. (2017), "Architettura come interfaccia", in Nebuloni, A. and Rossi, A. (Eds.), *Codice e Progetto. Il computational design tra architettura, design, territorio, rappresentazione, strumenti, materiali e nuove tecnologie*. Mimesis Edizioni, Milano.

<sup>2</sup> The volume of data currently committed in the world is about 40 zettabytes/year and follows an ever-increasing trend. One zettabyte corresponds to  $10^{21}$  bytes, about 180 million times the information collected in the records held in the Library of Congress in Washington, recognised as the largest existing library with more than 158 million records held.

<sup>3</sup> This was essentially done through processes of extrapolation and generalisation that allowed information to be collected and transmitted, translating reality into a simplified and reduced form suited to the recording and transmission limitations of the available media. Data and information have been formalised into a theoretical model usually governed by a cause-and-effect relationship expressed through syllogisms, mathematical functions or equations, with which ho-

mologous events can be inferred and predicted. The notation  $y = f(x)$ , for example, describes the relationships between the infinite number of points required to produce a line at all possible scales: in place of an abnormally long list of Cartesian coordinates, the elementary alphanumeric notation allows the coordinates of all the points it indexes to be recalculated.

<sup>4</sup> The program interprets the data and expresses requirements to guide the variables' direction, force, and action, such as open, close, slide, etc.

<sup>5</sup> In terms of the communicative dimension, and despite the invariance of the computational process, it is mainly light and sound components that prevail instead of the more classical "mechanical" cinematics.

<sup>6</sup> Applications that add advanced functionality to the basic software.

<sup>7</sup> Special attention is thus given to

Speed, C. and Oberlander, J. (2016). "Designing from, with and by Data: Introducing the ablative framework", in Lloyd, P. and Bohemia, E. (Eds.), *Proceedings of DRS2016*, Brighton.

the world of biology for its focus on the various behavioural patterns that natural organisms implement in their relationship with the environment.

# Tecnologie e spazi di prossimità: strumenti per scelte consapevoli nella transizione ecologica

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

Paola Marrone, <https://orcid.org/0000-0003-2843-7768>

Ilaria Montella, <https://orcid.org/0000-0001-8589-9681>

Federico Fiume, <https://orcid.org/0000-0002-0735-2370>

Dipartimento di Architettura, Università Roma Tre, Roma, Italia

RICERCA E  
Sperimentazione/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION

paola.marrone@uniroma3.it

ilaria.montella@uniroma3.it

federico.fiume@uniroma3.it

**Abstract.** Le città sono il principale campo di applicazione di innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica e la decarbonizzazione. Con riferimento ai suoi spazi di prossimità, la ricerca propone una visione multidisciplinare e transcalare in cui metodi analitici e quantitativi di progettazione urbana si combinano con metodi di valutazione qualitativa di progettazione tecnologica, per simulare e misurare gli impatti degli interventi in termini di mitigazione e adattamento agli effetti del cambiamento climatico. Uno strumento di supporto alla programmazione, basato sulla teoria dei giochi, orienta nella scelta tra soluzioni efficaci e interdipendenti per la decarbonizzazione attraverso la produzione energetica da fonti rinnovabili, servizi ecosistemici e accessibilità ai servizi essenziali.

**Parole chiave:** Mitigazione climatica; *Smart environment*; Accessibilità; Servizi Ecosistemici; Sistemi energetici decentrati.

## Introduzione e contesto di riferimento

Le città stanno affrontando una tripla crisi: gli impatti sulla salute del Covid-19; l'emergenza climatica ed ecologica; la diseguaglianza sociale ed economica. Per sostenere queste sfide, la UE ha definito un ampio quadro di strumenti per la transizione verso una crescita economica e sociale sostenibile<sup>1</sup>. Queste strategie si basano sulla consapevolezza che le città rappresentino un'importante forza trainante il cui potenziale d'integrazione intersettoriale sta trasformando in centri di innovazione e impegno sociale. Le città, infatti, sono il principale campo di applicazione di innovazioni tecnologiche per la transizione ecologica e la decarbonizzazione, in grado di creare economie di scala per la sperimentazione<sup>2</sup> di processi ideativi e scenari d'intervento, grazie alle applicazioni delle tecnologie dell'ICT, dell'IoT, del *monitoring* o *simulating*<sup>3</sup>.

In questo contesto, si presentano alcuni risultati di una ricerca<sup>4</sup> che sta studiando un sistema di supporto alle decisioni per pro-

getti di riconfigurazione degli spazi urbani di prossimità, finalizzati alla mitigazione e all'adattamento agli effetti dei cambiamenti climatici, a partire dal considerare condizioni multiple di sostenibilità individuate da tre ambiti d'intervento e dalle loro relazioni di interdipendenza più efficaci per la decarbonizzazione: energie rinnovabili, accessibilità e mobilità sostenibile, servizi ecosistemici.

## Dagli scenari alle decisioni: metodologia e risultati

Per individuare, in fase di programmazione, gli interventi più efficaci misurandone l'impatto, la ricerca<sup>4</sup> ha studiato:

- le tipologie di spazi di prossimità e le rispettive vocazioni per i casi studio individuati (fase 1);
- le loro potenzialità in "mappe delle opportunità", costruite con un sistema informativo per la loro caratterizzazione (fase 2);
- scenari di riconfigurazione per il potenziamento dei singoli tre ambiti d'intervento (fase 3);
- modelli di simulazione per la valutazione degli interventi relativi ai tre ambiti (fase 4);
- uno strumento di supporto alla scelta tra possibili opzioni d'intervento (fase 5).

## Spazi di prossimità e potenziali funzioni

La prima fase ha elaborato una tassonomia degli spazi di prossimità, ossia di quegli spazi urbani aperti che si configurano tra gli edifici (giardini pubblici o privati, corti, cortili, aree di risul-

## Technologies and proximity spaces: tools for conscious choices in ecological transition

**Abstract.** Cities are the main field of application of technological innovations for ecological transition and decarbonisation. With reference to its proximity spaces, the research proposes a multidisciplinary and transcalar vision in which analytical and quantitative methods of urban design are combined with qualitative assessment methods of technological design to simulate and measure the impacts of interventions in terms of mitigation and adaptation to the effects of climate change. A planning support tool, based on game theory, guides the choice between effective and interdependent solutions for decarbonisation through renewable energy production, ecosystem services and accessibility to essential services.

**Keywords:** Climate mitigation; Smart environment; Accessibility; Ecosystem services; Decentralised energy systems.

## Introduction and context

Cities are facing a triple crisis: the health impacts of Covid-19; climate and ecological emergency; social and economic inequality. To support these challenges, the EU has defined a broad framework of tools for the transition to sustainable economic and social growth<sup>1</sup>. These strategies are based on the realisation that cities represent an important driving force, whose potential for cross-sectoral integration is transforming them into centres of innovation and social engagement. Cities are, in fact, the main field of application of technological innovations for ecological transition and decarbonisation, capable of creating economies of scale for the experimentation<sup>2</sup> of ideational processes and intervention scenarios, thanks to the applications of ICT, IoT, monitoring or simulating technologies<sup>3</sup>.

In this context, we present some results of a research<sup>4</sup> that is studying a decision-making support system for projects to reconfigure urban proximity spaces, aimed at mitigating and adapting to the effects of climate change, starting from the consideration of multiple conditions of sustainability identified by three areas of intervention and their most effective interdependent relationships for decarbonisation: renewable energies, accessibility and sustainable mobility, ecosystem services.

## From scenarios to decisions: methodology and results

In order to identify, at the planning stage, the most effective interventions by measuring their impact, the research<sup>4</sup> studied:

- the types of proximity spaces and their respective vocations for the

ta, ma anche coperture praticabili, ecc.), partendo dall'analisi di cinque quartieri della città di Roma (Italia), Testaccio, Balduina, Tor Bella Monaca, Prima Porta, Piazza Mazzini, scelti come casi di studio perché rappresentativi di significative tipologie di evoluzione dei tessuti urbani. Nell'ambito più generale degli spazi urbani aperti, la ricerca si è posta inizialmente l'obiettivo di esplorare quelli strettamente interrelati agli edifici, escludendo, in questa fase, parchi pubblici, aree naturali e seminaturali (Fig. 1). Per ogni tipologia di spazio sono state individuate le potenzialità in termini di prestazioni, riconoscendo "funzioni oggi espresse ma non soddisfatte oppure in atto"; "funzioni innovative latenti oppure già in essere ma suscettibili di sviluppi interessanti nel prossimo futuro"; "funzioni che deriveranno da esigenze ad oggi non percepite ma che potrebbero affermarsi in futuro".

#### *Mappa delle opportunità*

L'ambiente urbano è caratterizzato da componenti molto eterogenee, rendendo spesso difficile identificare le matrici morfologiche, tecniche e strutturali del tessuto costruito. Questa difficoltà si rispecchia anche nelle azioni per una trasformazione dell'ambiente antropizzato verso città più sostenibili. È uno dei motivi per cui si parla di *transizione ecologica*, ossia di un processo che appunto richiede tempo per tener conto delle variazioni cui sono soggette di continuo le città, in quanto organismi vivi che mutano a velocità differenti in base al contesto e agli eventi (Droege, 2008). Si è deciso, pertanto, di proporre un approccio basato su scenari di transizione dell'assetto delle parti di città analizzate, potenziando le opportunità più efficaci in termini di decarbonizzazione.

- case studies identified (phase 1);
- their capabilities in "opportunity maps", built with an information system for their characterisation (phase 2);
- reconfiguration scenarios for the enhancement of the three individual areas of intervention (step 3);
- simulation models for the evaluation of interventions for the three fields (step 4);
- a tool to support the choice between possible intervention options (step 5).

#### *Proximity spaces and potential functions*

The first phase elaborated a taxonomy of proximity spaces, with reference to open urban spaces that are configured between buildings (public or private gardens, courtyards, courtyard areas, but also practicable roofs, etc.), start-

ing from the analysis of five districts in Rome (Italy) (Testaccio, Balduina, Tor Bella Monaca, Prima Porta, Piazza Mazzini), chosen as case studies because they are representative of significant types of urban fabric development. Within the more general framework of open spaces, the research initially set itself the objective of exploring those closely interrelated to buildings, excluding, at this stage, public parks, natural and semi-natural areas (Fig. 1). For each type of space, the potential in terms of performance was identified, recognising "functions that are currently expressed but not fulfilled or already in place"; "innovative functions that are latent or already in place but susceptible to interesting developments in the near future"; "functions that will derive from needs that are not perceived today but which may assert themselves in the future".

Nella fase 2, pertanto, è stato costruito un sistema informativo<sup>5</sup> per studiare la configurazione attuale degli spazi di prossimità e identificare le informazioni utili per elaborare scenari di decarbonizzazione nella fase 3. Dal sistema informativo sono state estratte le "mappe delle opportunità" che restituiscono le diverse tipologie di spazi fisici suscettibili di ospitare nuove o rafforzate funzioni relative ai tre ambiti considerati (Fig. 1).

#### *Scenari per prefigurare la transizione ecologica*

Definite le mappe delle opportunità, nella fase 3 sono stati elaborati alcuni scenari di transizione, al fine di massimizzare il potenziale di decarbonizzazione che gli spazi di prossimità possono offrire considerando singolarmente i tre ambiti d'intervento: produzione energetica da fonti rinnovabili (FER) in loco; potenziamento dei servizi ecosistemici; riorganizzazione della mobilità sostenibile e dei servizi di prossimità.

Per gli scenari di elettrificazione con FER è stato applicato il modello delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Si è cercato di valutare l'effettivo potenziale degli spazi e delle superfici disponibili, ipotizzando anche velari fotovoltaici temporanei, per accogliere sistemi di generazione energetica distribuita in rapporto ai consumi, dipendenti dalla densità abitativa, dalle funzioni degli edifici e dallo stato di conservazione di ciascun ambito urbano (Marrone and Montella, 2022). Con riferimento ai valori dei consumi medi riportati nel Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima del 2019, sono stati stimati dapprincipio i consumi attuali e poi tre scenari che prevedono potenzialità crescenti di produzione di energia elettrica da FER in rapporto ai consumi e, conseguentemente, definiscono la dimensione necessaria a costituire le CER stesse. Nello scenario

#### *Map of opportunities*

The urban environment is characterised by very heterogeneous components, often making it difficult to identify the morphological, technical and structural matrices of the built fabric. This difficulty is also reflected in actions for a transformation of the built environment towards more sustainable cities. This is one of the reasons why we speak of ecological transition, i.e. a process that precisely takes time to take into account the variations to which cities are continuously subjected as living organisms that change at different speeds according to context and events (Droege, 2008). It was decided, therefore, to propose an approach based on transition scenarios of the layout of the analysed parts of cities, enhancing most effective opportunities in terms of decarbonisation. Hence, in phase 2, an information sys-

tem<sup>5</sup> was constructed to study the current configuration of proximity spaces and to identify information useful for developing decarbonisation scenarios in phase 3. From the information system, 'opportunity maps' were extracted, showing the different types of physical spaces that are likely to host new or enhanced functions related to the three areas considered (Fig. 1).

#### *Scenarios for prefiguring the ecological transition*

Once the opportunity maps were defined, transition scenarios were developed in phase 3 to maximise the decarbonisation potential that proximity spaces can offer by considering the three areas of intervention individually: on-site renewable energy production (RES); enhancement of ecosystem services; and reorganisation of sustainable mobility and neighbourhood services.



### Proximity Open Spaces

- Green public spaces
- Traffic island
- Private garden
- Condominium gardens or/and courtyards
- Little courtyards (smaller than 200 m<sup>2</sup>)
- Archaeological area
- Green public spaces near the buildings
- Green private spaces near the buildings
- Relict areas
- Riparian vegetation

### 1st level of information

m<sup>2</sup>

- Soil cover
- Tree canopy coverage

### 2nd level of information

- Sealed
- Bare soil
- Heterogeneous
- Grass
- Water
- 0% coverage
- 10%-30% coverage
- 30%-50% coverage
- 50%-70% coverage
- 70%-90% coverage
- 100% coverage

E01, si è ipotizzata una produzione da FER utilizzando solo i tetti degli edifici con destinazione d'uso a servizi pubblici, e i consumi elettrici attuali; nello scenario E02 si è ipotizzato di utilizzare tutti i tetti, al 60% della superficie disponibile per i residenziali, e all'80% per i pubblici, e l'elettrificazione dei consumi termici (con PDC – COP 4); nello scenario E03, oltre alla produzione da FER ed elettrificazione dei consumi termici, è stato previsto anche l'efficientamento energetico degli edifici ipotizzando la riduzione del 50% dei consumi (Fig. 2).

Parimenti, per i servizi ecosistemici<sup>6</sup> sono stati elaborati due scenari costruiti su due elementi base; il primo di natura spaziale (gli spazi di prossimità disponibili per il rafforzamento dei servizi ecosistemici) e il secondo di natura funzionale (i servizi ecosistemici che possono essere concretamente rafforzati oppure introdotti nei diversi spazi di prossimità). Partendo dalla “mappa del cooling” attuale, espressiva del servizio ecosistemico oggi erogato nell'area di studio, ovvero del contributo che la vegetazione offre all'attenuazione dei picchi di calore, è stato costruito lo scenario SE01 ipotizzando l'incremento più ampio possibile della “*Tree Canopy Coverage*” – ed in senso esteso delle coperture vegetali, anche arbustive ed erbacee – negli spazi censiti nella relativa mappa delle opportunità. Lo scenario SE02 rappresenta uno “Scenario Multifunzionalità” che punta sia a un consistente incremento della “*Tree Canopy Cover*”, sia alla introduzione di servizi ecosistemici attualmente assenti nell'area di studio<sup>6</sup> (Fig. 3).

Analogamente ai due ambiti precedenti, anche per quello della mobilità e accessibilità è stato elaborato uno scenario MA01 che si ispira alla sperimentazione delle *Superilles* di Barcellona e che prevede di alternare le strade, una ogni due o tre, lasciando al-

For electrification scenarios with renewable energy sources, the Renewable Energy Communities (RECs) model was applied. An attempt was made to assess the actual potential of the available spaces and surfaces, also assuming temporary photovoltaic canopies, and to accommodate distributed energy generation systems in relation to consumption, depending on housing density, building functions and the state of conservation of each urban area (Marrone and Montella, 2022). With reference to the average consumption values reported in the 2019 National Integrated Energy and Climate Plan, first the current consumption was estimated and then three scenarios were illustrated that foresee increasing potential for electricity production from renewable energy in relation to consumption. They, consequently, define the size necessary

to constitute the RECs themselves. In the E01 scenario, production from renewable energy sources was assumed using only the roofs of buildings allocated for public services, and current electricity consumption. In the E02 scenario, all roofs were assumed to be 60% of the available surface area for residential buildings, and 80% for public buildings, and electrification of thermal consumption was presumed (with PDC – COP 4). In the E03 scenario, in addition to production from RES, and the electrification of thermal consumption, the energy efficiency was also envisaged, assuming a 50% reduction in consumption (Fig. 2). Similarly, for ecosystem services<sup>6</sup>, two scenarios were defined based on two basic elements; the first of a spatial nature (the proximity spaces available for the strengthening of ecosystem services) and the second of a func-

ternativamente una strada a maggiori funzioni di accessibilità, con viabilità carrabile, parcheggi e installazioni per la consegna a domicilio dei prodotti dell'*e-commerce*, e destinando l'altra ad ospitare gli interventi di più intensa trasformazione a favore della prossimità, con piste ciclabili, spazi di sosta, verde o servizi essenziali raggiungibili a piedi o in bicicletta. In questo scenario si persegue un criterio di sostenibilità urbana attraverso la riduzione dell'impatto ambientale della mobilità (Fig. 4).

#### Modelli di simulazione e acquisizione di dati

Allo scopo di misurare impatti e verificare l'efficacia degli interventi degli scenari dei tre ambiti, si è effettuato un *downscaling* scegliendo un quadrante significativo del quartiere considerato. Modelli di simulazione e metodologie di indagine sono stati elaborati nella fase 4 per acquisire dati propedeutici alla valutazione delle azioni previste negli scenari e delle loro possibili interazioni. Per quanto riguarda l'ambito Energia sono stati elaborati modelli<sup>7</sup> di:

- simulazione delle condizioni microclimatiche, verificate con misure ambientali *in situ*, per individuare criticità e punti di forza in termini di comfort degli spazi di prossimità;
- simulazione dell'irraggiamento dei fronti stradali più critici, per testare sistemi adattivi di ombreggiamento e produzione energetica;
- dimensionamento delle CER in rapporto ai consumi e alle strategie di efficienza energetica;
- valutazione del rischio per intercettare anomalie e garantire la continuità di erogazione energetica in distretti autosufficienti (Fig. 5).

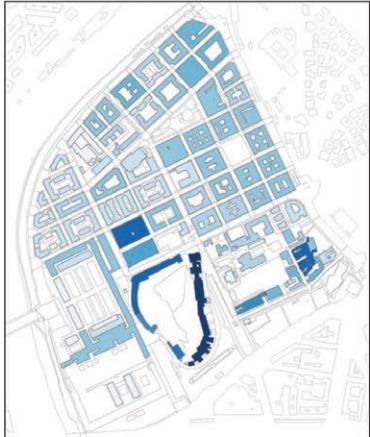
tional nature (the ecosystem services that can be concretely strengthened or introduced in the different proximity spaces). Starting from the current “cooling map”, expression of the ecosystem service currently provided in the study area, i.e. the contribution that vegetation offers to mitigating heat peaks, scenario SE01 was constructed by hypothesising the widest possible increase in Tree Canopy Coverage – and in a broader sense of vegetation cover, including shrubs and grasses – in the spaces surveyed in the relative map of opportunities. Scenario SE02 represents a Multi-Functional Scenario that aims both at a consistent increase in Tree Canopy Cover, and at the introduction of ecosystem services, which are currently absent in the study area<sup>6</sup> (Fig. 3).

Similarly to the two previous areas, an MA01 scenario has been defined for

that of mobility and accessibility, which is inspired by the Barcelona *Superilles* experimentation, and which envisages alternating the streets, one every two or three, leaving one street for more accessibility functions, with driveways, parking spaces and installations for the home delivery of e-commerce products, and allocating the other to host the most intense transformation interventions in favour of proximity, with bicycle lanes, parking spaces, green spaces or essential services that can be reached on foot or by bicycle. In this scenario, an urban sustainability criterion is pursued by reducing the environmental impact of mobility (Fig. 4).

*Simulation models and data acquisition*  
In order to measure impacts and verify the effectiveness of actions of the scenarios in the three areas, downscaling was carried out by choosing a signifi-

**Estimated annual electricity consumption**



**Estimated annual electricity PV production**



**Scenario E01:**

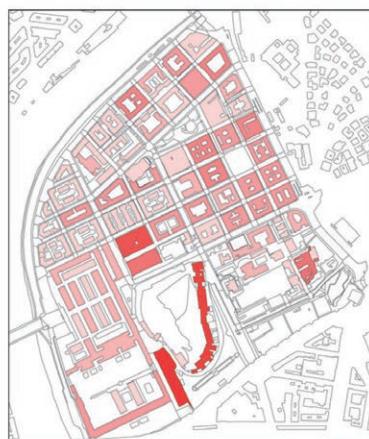
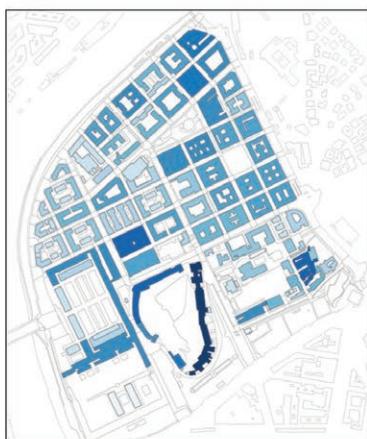
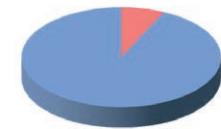
Estimated current electricity consumption:

**31.081,46 MWh/year**

Estimated electricity production from PV using only the roofs of public buildings and parking:

**2.339,79 MWh/year**

**8% of needs covered by RES**



**Scenario E02:**

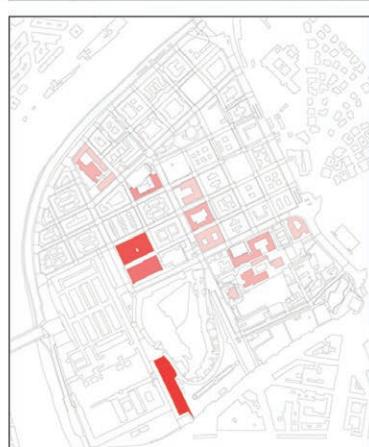
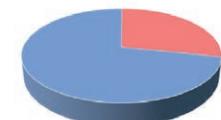
Estimated electricity consumption electric heating (heat pump COP 4\*):

**47.458,48 MWh/year**

Estimated electricity production from PV using all flat roof and all the available sloped roof\*\*:

**19.597,24 MWh/year**

**41% of need covered by RES**



**Scenario E03:**

Estimated electricity consumption post building energy upgrading intervention (heat pump COP 4\* and envelope upgrading) with 50% reduction in consumption:

**23.729,24 MWh/year**

Estimated electricity production from PV using only the roofs of public buildings and parking:

**2.339,79 MWh/year**

**10% of needs covered by RES**



1 - 30 MWh/year	
30 - 100 MWh/year	
100 - 200 MWh/year	
200 - 350 MWh/year	
350 - 500 MWh/year	
500 - 700 MWh/year	
700 - 900 MWh/year	
900 - 1.100 MWh/year	
1.100 - 4.500 MWh/year	
4.500 - 6.500 MWh/year	



1 - 200 MWh/year	
200 - 300 MWh/year	
300 - 400 MWh/year	
400 - 500 MWh/year	
500 - 600 MWh/year	
600 - 700 MWh/year	
700 - 800 MWh/year	
800 - 900 MWh/year	
900 - 950 MWh/year	



\*Thermal consumption was transformed into electrical consumption by dividing the sum of these by 4 (COP). This because almost all thermal needs are currently covered by gas heating systems, so, assuming these systems are replaced by electrical heat pumps, it was necessary to transform these thermal kWh into electric kWh.  
 \*\*For residential buildings using 60% of available space for non residential 80%.

03 | **Scenario SE00:**  
**Actual tree canopy**



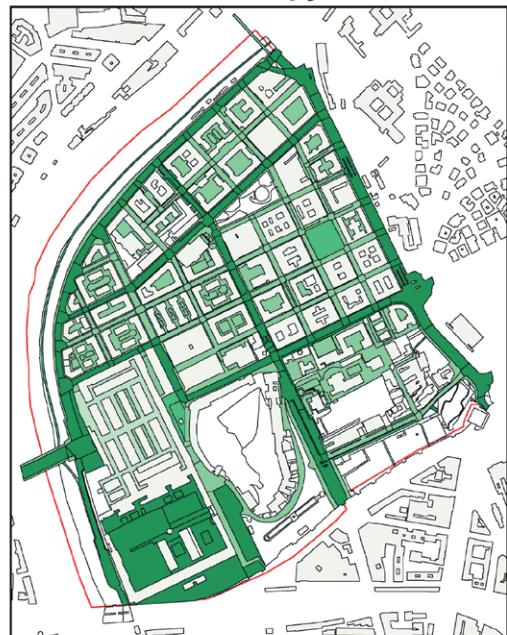
**Scenario SE02:**  
**Ecosystem services**



**Tree canopy coverage**

- 0% coverage
- 10%-30% coverage
- 30%-50% coverage
- 50%-70% coverage
- 70%-90% coverage
- 100% coverage

**Scenario SE01:**  
**Maximised tree canopy**



**Scenario interventions**

**Scenario SE01:**

The SE01 scenario was constructed anticipating the largest possible increase in "Tree Canopy Coverage"- and with a greater breadth vegetation cover, including bushes and grasses:

- Increase in tree cover, with an average "canopy" of 60/80%, along all streets, open parking areas and relevant spaces
- Increase of vegetation and bush coverage in private gardens, courtyards, open private and public spaces
- Creation of green roofs on all the flat roofs of buildings
- "Desealing" and planting in derelict areas

**Scenario SE02:**

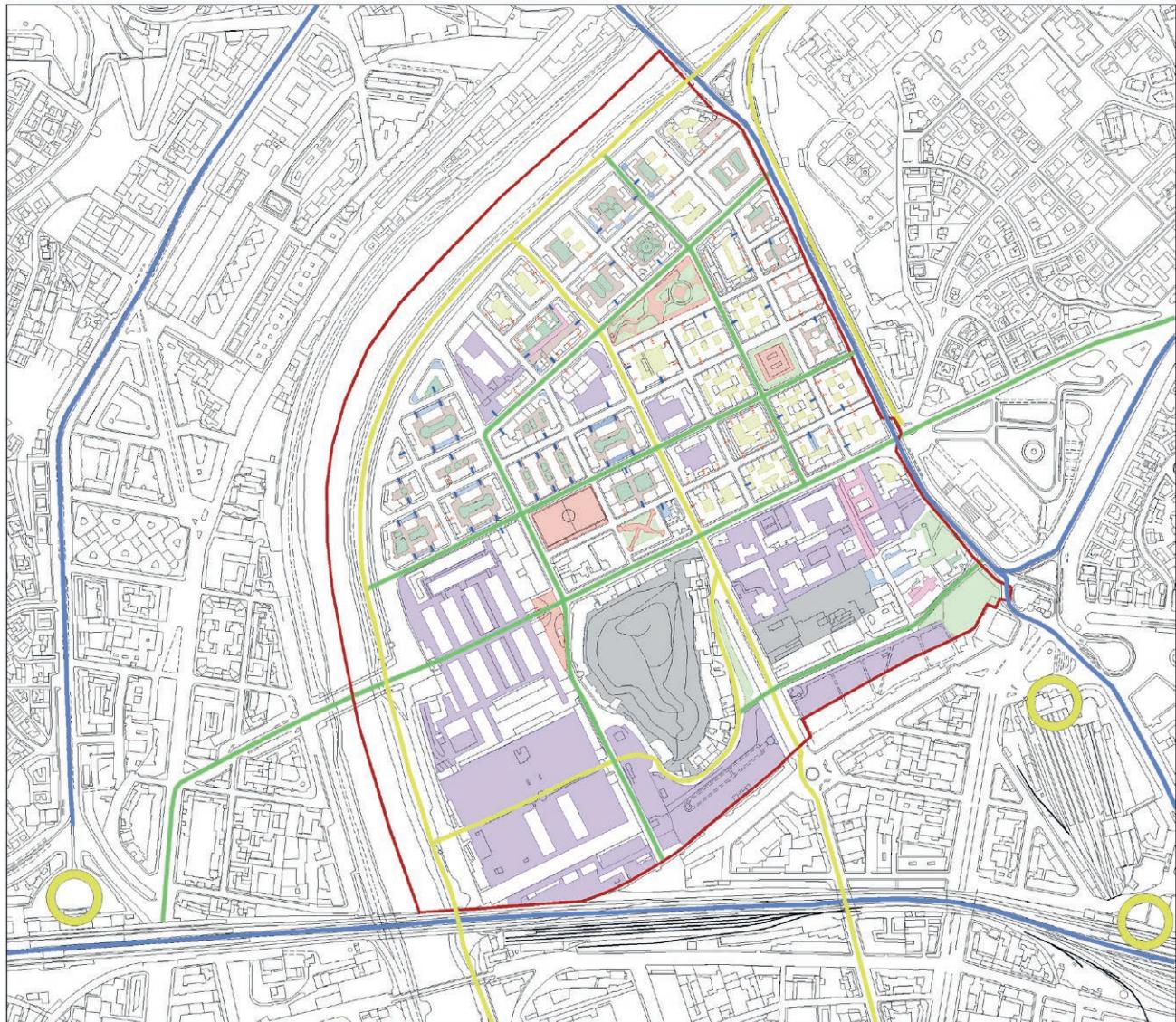
Scenario SE02 represents a "Multifunctionality Scenario" that aims at both a substantial increase in tree canopy cover and the introduction of ecosystem services that are currently absent in the study area:

- Enhance the provision of street trees
- Develop and extend tree planting in public gardens
- "Desealing" of a large unused asphalt area
- Creation of urban vegetable gardens
- Sitting "facilities/green points" in the communal gardens and courtyards
- Creation of a children's playground
- Creation of "swales"
- Increasing the usability of archaeological areas
- Placement of green roofs on all flat roofs

**Ecosystem services**

- Green points
- Urban vegetable garden
- Cool path
- Swales
- Public park
- Children's playground
- Archeological area
- Green roof
- Habitat restoration

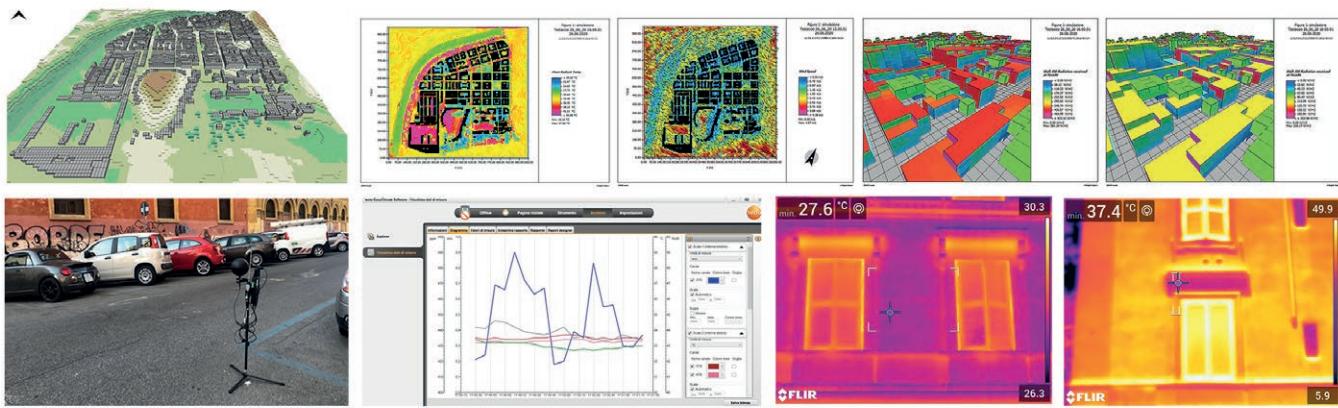
## Scenario MA01:



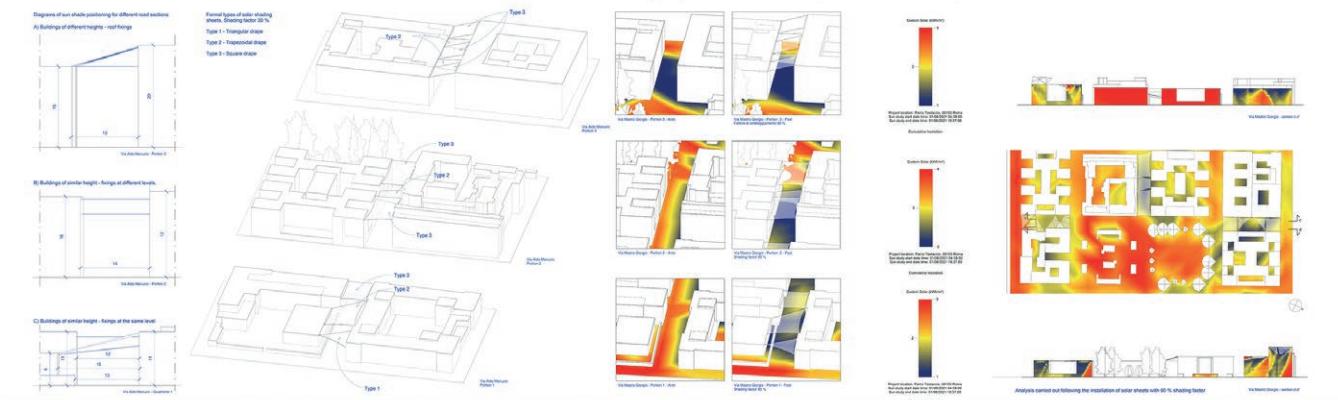
## Scenario MA01:

	Condominium gardens
	Courtyards
	Shared gardens
	Little courtyards
	Relict areas
	Open spaces of public buildings
	Green public spaces
	Green public spaces near the buildings
	Condominium area for specific uses
	Metropolitan mobility points
	Railway
	Cycling roads or ways for sustainability interventions
	Network of sustainability routes
	Routes designed for accessibility functions
	Pedestrian accesses
	Cycle accesses

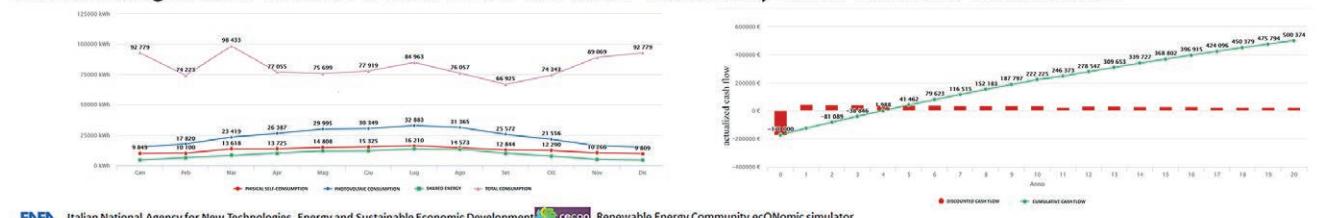
05 | Microclimate conditions simulations with ENVI-met software and in situ environmental measurements



Irradiance simulation of road facades for adaptive shading systems using Revit's Insights software



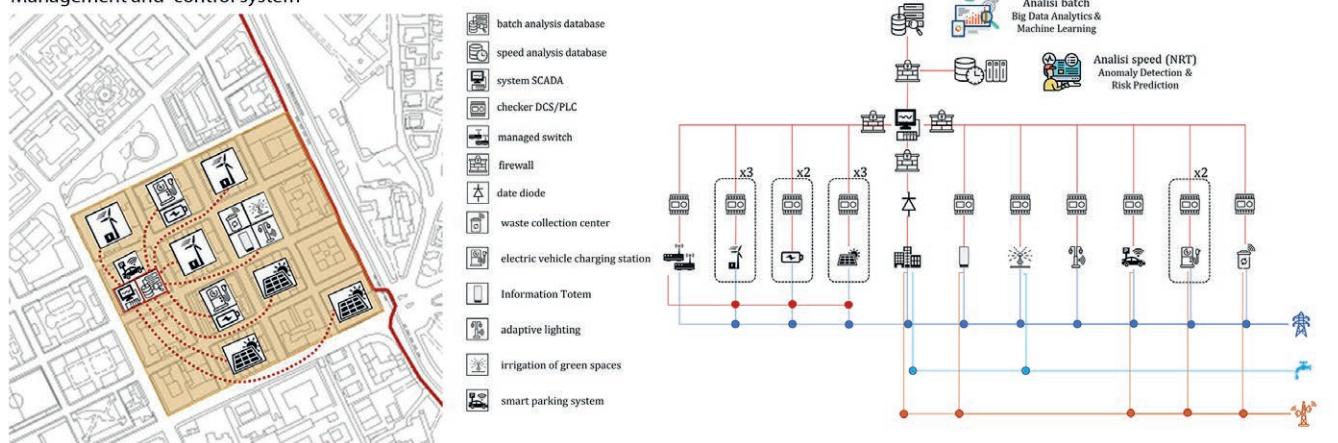
Dimensioning of RECs with the RECON tool of the ENEA - Laboratory Smart Cities and Communities



ENEA Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development  Recon Renewable Energy Community ecONomic simulator

Dimensioning of RECs with the RECON tool of the ENEA - Laboratory Smart Cities and Communities

Management and control system



Per quanto riguarda l'ambito Servizi Ecosistemici è stato elaborato un modello per la valutazione dell'efficacia del “*Tree Canopy Coverage*” e simularne la “*cooling capacity*”. Questo modello si è avvalso di una metodologia sperimentata in una recente ricerca (Geneletti *et al.*, 2020) in cui la “*cooling capacity*” non è traducibile effettivamente in termini di diminuzione delle temperature, ma di differenze di temperature indotte dai successivi scenari di rafforzamento dei servizi ecosistemici, utile pertanto per un confronto tra scenari e tra casi di studio.

Lo scenario della mobilità sostenibile e dell'accessibilità è stato studiato con riferimento al noto modello della città dei 15' (Moreno *et al.*, 2021). Poiché la definizione di città dei 15' è più una valutazione a posteriori che uno strumento progettuale che possa essere sfruttato per ricucire il tessuto urbano e collocare servizi utili ai fini della transizione ecologica, è stato introdotto un altro modello, quello della teoria dei grafi in ambito urbano. Se rappresentiamo la città come un grafo (D'Autilia and Spada, 2018; Achler *et al.*, 2010), allora, possiamo riformulare il concetto di città dei 15' non più come un'area intorno al servizio, ma come l'intersezione su tutti i servizi dell'unione degli insiemi di punti che accedono a un tipo di servizio in meno di 15' (C40, 2020). In questa rappresentazione i nodi dei 15-minuti mostrano topologie complesse che identificano lo stato di salute ambientale di un quartiere e dal quale, pertanto, dedurre dove collocare i possibili servizi di tipo ecologico trasformandoli in elementi di connessione (Fig. 6).

#### *Dai modelli per prefigurare a uno strumento di supporto alle decisioni*

Delineati gli scenari con i modelli di calcolo e simulazione, nell'ultima fase, sono state misurate le effettive potenzialità degli

cant quadrant of the district considered. Simulation models and survey methodologies were defined in phase 4 to acquire preparatory data for the evaluation of actions foreseen in the scenarios and their possible interactions.

With regard to the Energy area, models' were developed for:

- simulation of microclimatic conditions, verified with in-situ environmental measurements, to identify criticalities and strengths in terms of the comfort of proximity spaces;
- simulation of the irradiation of the most critical street frontages, to test adaptive shading and energy production systems;
- sizing of RECs in relation to consumption and energy efficiency strategies;
- risk assessment to intercept anomalies and ensure energy supply continuity in self-sufficient districts (Fig. 5).

In the area of Ecosystem Services, a model was developed to assess the effectiveness of Tree Canopy Coverage and to simulate cooling capacity. This model made use of a methodology tested in recent research (Geneletti *et al.*, 2020) in which the cooling capacity is not actually translatable in terms of decreasing temperatures, but in terms of temperature differences induced by successive Ecosystem Service enhancement scenarios. This is useful for a comparison between scenarios and between case studies.

The sustainable mobility and accessibility scenario was studied with reference to the well known 15' city model (Moreno *et al.*, 2021). Since the definition of the 15' city is more of an *a posteriori* evaluation than a design tool that can be exploited to stitch together the urban fabric and place useful services for the purpose of eco-

spazi di prossimità in termini di capacità di mitigazione e adattamento attraverso gli interventi attuabili e relativi alla costituzione di sistemi energetici rinnovabili distribuiti in rapporto ai consumi e alle diverse condizioni fisico-ambientali (Fremouw, *et al.*, 2020); al potenziamento dei servizi ecosistemici e, soprattutto, della loro “*cooling capacity*”; alla dislocazione, in un'ottica di accessibilità e mobilità sostenibile, dei servizi essenziali.

Poiché per ciascun ambito d'intervento si prefigurano soluzioni tra loro alternative, la ricerca ha cominciato a studiare uno strumento di supporto alla scelta dell'intervento più efficace in termini di contributo teorico alla decarbonizzazione, che può essere calcolato sulla base dei costi economici, dei benefici ambientali e dei vincoli urbani. Tuttavia, poiché gli interventi possibili insistono su aree già abitate, la scelta deve coinvolgere in qualche modo i cittadini che abitano la zona e corrisponde, pertanto, a un modello teorico che rappresenta un obiettivo da approssimare nel migliore modo possibile.

Il modello teorico prevede la diffusione capillare di piccoli interventi in punti in cui gli interessi degli abitanti possono essere in conflitto, ad esempio, con le scelte sulla destinazione d'uso degli spazi di prossimità. Questo problema viene generalmente affrontato attraverso la partecipazione (Hirt and Zahm, 2012) o gli incentivi economici (Liu *et al.*, 2021).

La modellizzazione delle scelte partecipative guidate da possibili incentivi economici o ambientali può essere calcolata con un modello di “*population game*”, cioè una dinamica di popolazione guidata da un modello di Teoria dei Giochi (Sandholm, 2010)<sup>8</sup>. Abbiamo applicato questa teoria al caso pilota del quartiere di Testaccio, considerando come 'agenti' gli spazi di prossimità e come 'strategie' i loro usi; abbiamo sperimentato questa teoria

logical transition, another model was introduced, that of graph theory in the urban context. If we represent the city as a graph (D'Autilia and Spada, 2018; Achler *et al.*, 2010), then we can no longer reformulate the concept of the 15-minute city as an area around the service, but as the intersection over all services of the union of sets of points that access a type of service in less than 15' (C40, 2020). In this representation, the 15-minute nodes show complex topologies that identify the environmental health status of a district, and from which the position of possible ecological services can be deduced by transforming them into connecting elements (Fig. 6).

#### *From prefiguring models to a decision-making support tool*

Having outlined the scenarios with calculation and simulation models,

in the last phase, the actual potential of proximity spaces was measured in terms of mitigation and adaptation capacity through implementable interventions related to the constitution of distributed renewable energy systems in relation to consumption and different physical-environmental conditions (Fremouw, *et al.*, 2020); to the enhancement of ecosystem services and, above all, their cooling capacity; and to dislocation of essential services, with a view to accessibility and sustainable mobility.

As alternative solutions are envisaged for each area of intervention, research has begun to study a tool to support the choice of the most effective intervention in terms of its theoretical contribution to decarbonisation, which can be calculated on the basis of economic costs, environmental benefits and urban constraints. However, since

06 | **Graph 15 minute city:  
 Testaccio**



- Point ≤ 15' far from pharmacy, supermarket and post office
- Point > 15' far from pharmacy, supermarket and post office
- Streets

**Graph 15 minute city:  
 Prima Porta**



the possible interventions insist on areas that are already inhabited, the choice must, somehow, involve citizens living in the area and, therefore, correspond to a theoretical model that represents a target to be approximated as far as possible.

The theoretical model envisages the widespread implementation of small interventions in places where the interests of the inhabitants may conflict, for example, with decisions on the use of proximity spaces. This is generally addressed through participation (Hirt and Zahm, 2012) or economic incentives (Liu *et al.*, 2021).

The modelling of participatory choices driven by possible economic or environmental incentives can be calculated with a 'population game' model, i.e. a population dynamic driven by a Game Theory model (Sandholm, 2010)<sup>8</sup>. We have applied this theory to the pilot

case of the Testaccio district, considering proximity spaces as 'agents' and their uses as strategies. We have tested this theory on flat roofs for experimentation, whose uses – according to the scenarios outlined above – may be the installation of photovoltaic panels, heat pumps, green roofs or even a non-intervention. Each strategy has an economic cost and an environmental benefit, and the payoff of an agent depends on the behaviour of its opponent in the sense that, if the opponent installs photovoltaic panels, it may become worthwhile for the agent to install an electric heat pump because the cost of energy has been reduced.

The environmental benefit of each strategy can be calculated in terms of a reduction in emissions. The evaluation of the cost of the strategy is more complex because it concerns the investment, its payback time, the change

in property value or the hedonic price. With the intention of quantifying the achievable decarbonisation, a transition from the current state of electricity consumption to production from renewable sources was hypothesised for application to the flat roofs of Testaccio. The purpose was to identify, among the conflicts of use of the space, the equilibrium condition in which it will not be convenient to change the intended use because it has been identified as the most convenient strategy in terms of the ratio between the economic cost of the intervention and the achievable environmental benefit.

A payoff matrix was hypothesised in which, for experimental purposes, only three roof use variables were considered: preservation of the current state of consumption (N), installation of photovoltaic panels for electricity production (PV), and installation of

heat pumps for winter air conditioning (PDC).

The electricity and heat costs in the current situation were calculated from sources in the literature and from the estimated kWh cost averaged between that of various electricity and gas suppliers. A CO<sub>2</sub>/kWh value was assigned for the calculation of the environmental costs, of the electricity and heat portion (Lo Vullo *et al.*, 2020) (Fig. 7). To compare the costs of the current situation with the other two variables (PV and PDC), the same methodology was repeated for both configurations, also taking into account the installation and maintenance costs and, for the PDC, the costs of electricity for activation<sup>9</sup>.

At this point a payoff matrix was set up to study the possible combinations of use of the 100 m<sup>2</sup> flat roof of two Testaccio buildings, entering the

sui tetti piani, i cui usi – secondo gli scenari precedentemente delineati – possono essere l’installazione di pannelli fotovoltaici, di pompe di calore, di tetti verdi o anche un non-intervento. Ogni strategia ha un costo economico e un beneficio ambientale e il *payoff* di un ‘agente’ dipende dal comportamento del suo ‘opponente’ nei termini in cui, se l’opponente installa pannelli fotovoltaici, può diventare conveniente per l’agente installare una pompa di calore elettrica perché il costo dell’energia si è ridotto. Il vantaggio ambientale di ciascuna strategia può essere calcolato in termini di riduzione delle emissioni; la valutazione del

costo della strategia è invece più complessa perché riguarda l’investimento, il suo tempo di recupero, il cambiamento del valore immobiliare o il prezzo edonico.

Con l’intento di quantificare la decarbonizzazione conseguibile, per l’applicazione ai tetti piani di Testaccio è stata ipotizzata una transizione dallo stato attuale dei consumi elettrici a una produzione da fonte rinnovabile per individuare, tra i conflitti d’uso dello spazio, la condizione di equilibrio in cui non verrà cambiare la scelta d’uso, perché identificata come strategia più conveniente in termini di rapporto tra costo economico

## ACTUAL CONSUMPTIONS ➤ ENERGY TRANSITION ➤ FUTURE CONSUMPTIONS

| 07



building of 100 sqm



building of 100 sqm



building of 100 sqm



### CURRENT CONSUMPTION SCENARIO<sup>1</sup>

• Electric consumptions: 21 kWh/sqm per year x 100 sqm = 2.100 kWh per year • Thermal consumptions: 123 kWh/sqm per year x 100 sqm = 12.300 kWh year



### ANNUAL ECONOMICAL COSTS<sup>2</sup>

- Electric: 2.100 kWh x € 0,28/kWh = € 588,00 per year
- Thermal (gas): 1.149,53 m<sup>3</sup> per year<sup>3</sup> x 1,08 €/m<sup>3</sup> = 1.241,9 € per year



### ANNUAL ENVIRONMENTAL COSTS

- Electric: 2.100 kWh x 0,352 kg CO<sub>2</sub>/kWh = 739,2 kg CO<sub>2</sub> per year
- Thermal: 12.300 kWh x 0,277 kg CO<sub>2</sub>/kWh = 3.4071,1 kg CO<sub>2</sub> per year

**TOTAL ECONOMICAL COSTS =**  
**1.829,49 € per year**

**TOTAL ENVIRONMENTAL COSTS =**  
**4.146,3 kg CO<sub>2</sub> per year**



### ANNUAL ECONOMICAL COSTS<sup>4</sup>

- Installation: € 12.000,00/25 per years = € 480,00 per year
- Maintenance: € 35,00/kWp per year x 10 kWp = € 350,00 per year



### ECONOMICAL UTILITIES PV

- Electricity bill savings: 10 kWp<sup>7</sup> x 1.562 kWh/sqm x 1,13 x 0,8 = 14.120,50 kWh per year

For current electricity consumption of 2.100 kWh year, there is the complete savings of the electricity bill € 588,00 per year



### ENVIRONMENTAL UTILITIES PV

- CO<sub>2</sub> savings: the cost of the electricity component, 739,2 kg CO<sub>2</sub> per year, is subtracted



### ANNUAL ECONOMICAL COSTS<sup>4</sup>

- Installation: € 15.000,00/25 per years = € 600,00 per year
- Maintenance: € 150,00 per year
- Electricity: 12.300 kWh per year (thermal)/4 (Heat Pump COP)<sup>6</sup> = 3075 kWh per year (electric) x € 0,28/kWh = € 861



### ECONOMICAL UTILITIES HP

- Thermal bill savings: the HP replaces existing gas boilers, so there is a zero gas consumption, with a bill savings of € 1241,49 per year



### ENVIRONMENTAL UTILITIES HP

- CO<sub>2</sub> savings: the CO<sub>2</sub> cost of the gas component was subtracted from the initial environmental cost and the CO<sub>2</sub> amount of the HP electrical consumption was added. 3.407,1 kg CO<sub>2</sub> per year - (3075 kWh per year x 0,352 kg CO<sub>2</sub>/kWh) = 2324,7 kg CO<sub>2</sub> per year

N: actual consumptions PV: Photovoltaic panels HP: heat pumps

<sup>1</sup> | source: Integrated National Energy and Climate Plans (NIPECs), Electricity consumption: 21 kWh/sqm per year; Thermal consumption: 123 kWh/sqm per year; Total consumption: 144 kWh/sqm per year (energy data of current buildings with fossil fuel thermal generator)

<sup>2</sup> | Average cost per kWh estimated among various electricity and gas suppliers in July 2022

<sup>3</sup> | To calculate the thermal costs due to methane gas, kWh per year was transformed into m<sup>3</sup> per year (1 kWh contains thermal energy generated by burning 0.09345806 m<sup>3</sup> gas (12300 kWh per year x 0.09345806 = 1.149,53 m<sup>3</sup> gas per year)

<sup>4</sup> | Estimated prices per kWp in the Superbonus 100% scenario, assuming a reference period of 25 years of life cycle, and spreading the costs over the time period

<sup>5</sup> | Considering 1kWp/10 sqm and a total area of 100 sqm

<sup>6</sup> | A consumption of 0,25 electrical W for each thermal W

<sup>7</sup> | Estimated annual production of 10 kWp on 100 sqm, average radiation on horizontal surface of 1.562 kWh/sqm, correction coefficient of 1,13 (tilt of 30° and South orientation), coefficient of 0,8 for 20% losses

dell'intervento e beneficio ambientale conseguibile.

È stata ipotizzata una matrice di *payoff* in cui, a scopo sperimentale, sono state considerate solo tre variabili d'uso del tetto: conservazione dello stato attuale dei consumi (N), installazione di pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica (FV), installazione di pompe di calore per la climatizzazione invernale (PDC).

A partire da fonti in letteratura, e dal costo in kWh stimato in media tra quello di vari fornitori di energia elettrica e di gas, sono stati calcolati i costi elettrici e i costi termici in bolletta della situazione attuale. Per il calcolo dei costi ambientali, della porzione elettrica e termica, è stato attribuito un valore di CO<sub>2</sub>/kWh (Lo Vullo *et al.*, 2020) (Fig. 7).

Per confrontare i costi della situazione attuale, con le altre due variabili (FV e PDC) è stata ripetuta la stessa metodologia per entrambe le configurazioni inserendo anche i costi per l'installazione e la manutenzione e, per la PDC, i costi dell'energia elettrica per l'attivazione<sup>9</sup>.

A questo punto è stata impostata una matrice di *payoff* per lo studio delle possibili combinazioni d'uso del tetto piano di 100 m<sup>2</sup> di due edifici di Testaccio, inserendo i valori in € e in CO<sub>2</sub> calcolati per le varie opzioni, ed eseguendo il rapporto tra costo unitario e decarbonizzazione (€/kg CO<sub>2</sub>) secondo la bimatrice in cui N, FV e PDC sono il rapporto per unità di area tra costo economico e decarbonizzazione delle diverse strategie sui due tetti.

Facendo evolvere il sistema, un punto di equilibrio stabile si ottiene quando il 10% dei tetti resta inutilizzato, il 72% installa pannelli fotovoltaici e il restante 18% viene utilizzato per le pompe di calore, come mostrato nella Fig.8 elaborata con

values in € and in CO<sub>2</sub> calculated for the various options, and carrying out the ratio between unit cost and decarbonisation (€/kg CO<sub>2</sub>) according to the bimatrix in which N, PV and PDC are the ratio per unit area between economic cost and decarbonisation of the various strategies on the two roofs. By evolving the system, a stable equilibrium point is obtained when 10% of the roofs remain unused, 72% install photovoltaic panels, and the remaining 18% are used for heat pumps, as shown in Fig. 8 obtained with EvoDyn-3s (Izquierdo *et al.*, 2018). In this way, we obtain "spontaneous" dimensioning towards which the population dynamics of flat roofs converge.

#### Conclusions

The phase-out from coal-fired generation has presented challenging objectives that do not only concern climate

change, but an ecological crisis, which must come to terms with multiple 'unsustainable conditions', from the consumption of available resources to ecosystem alterations, from impact on our health to the safety of the environment in which we live. For example, if the use of non-programmable sources, such as wind and photovoltaic power, is today a condition that cannot be postponed in order to achieve a generation almost exclusively from renewable sources by 2030, the construction of plants and components necessary to use renewable sources will entail a consumption of materials that will dramatically affect mining, with uncontrollable impacts on the landscape. One understands, then, how conscious choices for the ecological transition depend on a complex framework of 'conveniences'. For this reason, the research presented was developed by

EvoDyn-3s (Izquierdo *et al.*, 2018). In questo modo otteniamo un dimensionamento "spontaneo" verso cui converge la dinamica della popolazione dei tetti piani.

#### Conclusioni

Il *phase-out* dalla generazione a carbone ha posto obiettivi sfidanti che non riguardano soltanto il cambiamento climatico, ma una crisi ecologica che deve fare i conti con molteplici "condizioni di insostenibilità", dal consumo delle risorse disponibili alle alterazioni ecosistemiche, dagli impatti sulla nostra salute alla sicurezza dell'ambiente in cui viviamo. Per esempio, se il ricorso a fonti non programmabili, come eolico e fotovoltaico, è oggi una condizione improcrastinabile per raggiungere entro il 2030 una generazione quasi soltanto da rinnovabile, la realizzazione di impianti e di componenti necessari per impiegare fonti rinnovabili comporterà un consumo di materiali tale da incidere drammaticamente sull'attività di *mining*, con incontrollabili impatti paesaggistici. Si comprende, allora, come scelte consapevoli per la transizione ecologica dipendano da un complesso quadro di "convenienze". Per questa ragione, la ricerca presentata è stata sviluppata cercando le relazioni più efficaci tra tre aspetti determinanti della decarbonizzazione – energia accessibilità e mobilità, servizi ecosistemici – attraverso i quali individuare e misurare gli impatti degli interventi di riconfigurazione degli spazi di prossimità della città. Modelli di analisi quantitativa e qualitativa alle scale urbana e tecnologica sono stati utilizzati per prefigurare le soluzioni e il loro impatto. Un supporto alle decisioni in fase di programmazione basato sulla teoria dei giochi permette di individuare un "punto di equilibrio" tra diverse opzioni progettuali, misurandone il vantaggio ambientale.

searching for the most effective relationships between three determining aspects of decarbonisation – energy accessibility and mobility, ecosystem services – through which to identify and measure the impacts of interventions to reconfigure the city's proximity spaces. Quantitative and qualitative analysis models at the urban and technological scales were used to prefigure solutions and their impacts. Support to decision-making at the planning stage based on game theory allows the identification of a 'balance point' between different design options by measuring the environmental benefit in terms of emissions, and the cost of the investment in terms of payback time, change in property value or hedonic price. Support to decision-making thus defined makes it possible to measure, in relation to achievable economic and environmental benefits, the possible

options of use and the related technological solutions corresponding to the three areas of intervention – energy, mobility and ecosystem services – for neighbourhood spaces, suggesting their preferential callings to public administrators and planners appointed to pursue outcomes that are now increasingly verifiable.

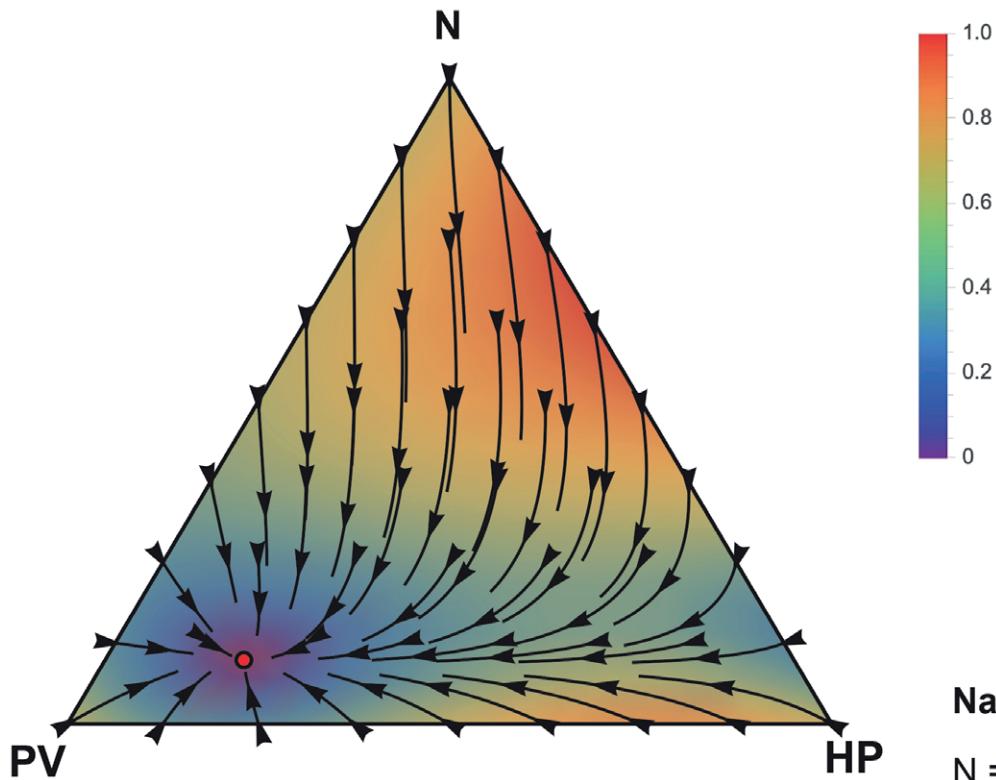
#### AUTHOR ATTRIBUTION AND ACKNOWLEDGEMENTS

Introduction, P.M.; Methodology, P.M. and I.M.; Models, I.M, F.F.; Decisions, I.M, F.F.; Conclusion, P.M. Special thanks to Roberto D'Autilia for the elaborations on Game Theory and City of 15<sup>1</sup>.

#### NOTES

<sup>1</sup> Among the many initiatives: European Green Deal (EGD) strategy; Next-GenerationEU and Recovery and Re-

## Nash equilibrium to the game theory for the use of the flat roof: N, PV and HP | 08



Economical payoff matrix 10 years period (€/year)

	N		PV		HP	
N	1.829,49	1.829,49	1.241,49	2.071,49	1.829,49	2.199,00
PV	2.071,49	1.241,49	2.071,49	2.071,49	2.071,49	750,00
HP	2.199,00	1.829,49	750,00	2.071,49	2.199,00	2.199,00

Nash equilibrium in %:

N = 10%  
 PV = 72%  
 HP = 18%

Ecological payoff matrix 10 years period (kg CO<sub>2</sub>/year)

	N		PV		HP	
N	4.146,3	4.146,3	3.776,7	3.776,7	2.984,0	2.984,0
PV	3.776,7	3.776,7	3.407,1	3.407,1	1.703,6	1.703,6
HP	2.984,0	2.984,0	1.703,6	1.703,6	2.324,7	2.324,7

Economic/ecological payoff matrix 10 years period (€/kg CO<sub>2</sub>/year)

	N		PV		HP	
N	0,44	0,44	0,33	0,55	0,61	0,74
PV	0,55	0,33	0,61	0,61	1,22	0,44
HP	0,74	0,61	0,44	1,22	0,95	0,95

tale in termini di emissioni e il costo dell'investimento in ragione del tempo di recupero, del cambiamento del valore immobiliare o del suo prezzo edonico. Il supporto alle decisioni così elaborato consente di misurare, in relazione a benefici economici e ambientali raggiungibili, le opzioni possibili d'uso e le relative soluzioni tecnologiche corrispondenti ai tre ambiti d'intervento energia, mobilità e servizi ecosistemici, per gli spazi di prossimità, suggerendone le vocazioni preferenziali agli amministratori pubblici e ai progettisti chiamati a perseguire esiti oggi sempre più verificabili.

#### ATTRIBUZIONE AUTORI E RICONOSCIMENTI

Introduction, P.M.; Methodology, P.M. e I.M.; Models, I.M, F.F; Decisions, I.M, F.F; Conclusion, P.M.

Un particolare ringraziamento a Roberto D'Autilia per le elaborazioni su Teoria dei Giochi e Città dei 15'.

#### NOTE

<sup>1</sup> Tra le numerose iniziative: Strategia del *Green Deal* europeo (EGD); *Next-GenerationEU* e dispositivo per la ripresa e la resilienza (PNRR); Nuova iniziativa Bauhaus europea (NEB); Agenda Urbana europea 2021–2027; “*Fit For 55*” package.

<sup>2</sup> La EU ha selezionato 100 città che parteciperanno alla *EU Mission for 100 climate-neutral and smart cities by 2030*.

<sup>3</sup> Si vedano i numerosi interventi su *The European Climate Adaptation Platform Climate-ADAPT*.

<sup>4</sup> La ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto PRIN 2017 “TECHSTART-key enabling TECHnologies and Smart environmenT in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation” (PI Prof. Mario Losasso).

silence Facility (NRP); New European Bauhaus Initiative (NEB); European Urban Agenda 2021-2027; ‘Fit For 55’ package.

<sup>2</sup> The EU has selected 100 cities to participate in the EU Mission for 100 climate-neutral and smart cities by 2030.

<sup>3</sup> See the numerous contributions on The European Climate Adaptation Platform Climate-ADAPT.

<sup>4</sup> The research was conducted as part of the PRIN 2017 project “TECH-START-key enabling TECHnologies and Smart environmenT in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation” (PI Prof. Mario Losasso).

<sup>5</sup> The database was developed with QGIS and Open Street Map basis.

<sup>6</sup> Reference is made to the definition in the Millennium Ecosystem Assessment (2005).

<sup>5</sup> Il data base è stato elaborato con QGIS e base *Open Street Map*.

<sup>6</sup> Si fa riferimento alla definizione contenuta nel *Millennium Ecosystem Assessment* (2005).

<sup>7</sup> I modelli sono stati elaborati con i software: ENVI-met (condizioni microclimatiche attuali e di progetto); Insights di Revit (ombreggiamento fronti stradali e irraggiamento superfici); tool RECON ENEA-Laboratorio *Smart Cities and Communities* (CER); *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) (previsione del rischio).

<sup>8</sup> Questo approccio è stato di recente utilizzato per calcolare l'evoluzione dell'uso delle abitazioni a Venezia (Arbara and D'Autilia, 2021), e può essere una metodologia molto efficiente per il dimensionamento degli usi degli spazi di prossimità considerando essi come agenti, i cui comportamenti non condizionano localmente le altre scelte, determinando che il *payoff* dipenda solo dalle scelte degli opposenti. Dato che nei “*population game*” i *payoff* sono definiti come funzioni continue, il rapporto tra costi economici e benefici ambientali può essere un buon criterio quantitativo per misurare quale scelta, individuata secondo gli scenari dei tre ambiti d'intervento, sia più efficace. Dunque il modello prevede una sola popolazione e un set S di possibili strategie (usì degli spazi) allo scopo di calcolare quale frazione degli agenti, che chiamiamo “stato sociale”, adotterà l'una o l'altra strategia. A questo scopo è necessaria una matrice che associa ad ogni stato sociale un *payoff* F, economico e ambientale, per ogni strategia, consentendo di calcolare il *payoff* complessivo dell'area e il livello di decarbonizzazione. Individuate le strategie, possiamo dire che uno stato sociale è un equilibrio di Nash per il gioco F se ogni agente sceglie la risposta migliore (Izquierdo *et al.*, 2018). Definendo una matrice A di *payoff* come in Teoria dei Giochi, allora un “*population game*” è dato dall'equazione  $F(x)=Ax$  dove x è lo stato della popolazione. Questo comportamento viene iterato fino al raggiungimento di un equilibrio.

<sup>9</sup> Sono stati calcolati i benefici economici dovuti alla produzione di energia elettrica da PV, tenendo conto del risparmio sulla bolletta elettrica rispetto alla configurazione iniziale, e i benefici economici dovuti alla PDC, considerando l'azzeramento del consumo di gas per il riscaldamento e il relativo

<sup>7</sup> The models were elaborated with the software: ENVI-met (current and project microclimatic conditions); Insights of Revit (road frontage shading and surface irradiation); RECON tool ENEA-Laboratorio Smart Cities and Communities (CER); Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) (risk forecasting).

<sup>8</sup> This approach, which has recently been used to calculate the evolution of housing use in Venice (Arbara and D'Autilia, 2021), can be a very efficient methodology for dimensioning the uses of proximity spaces that consider them as agents, whose behaviour does not locally condition other choices, and the payoff depends only on the choices of the opponents. Since in population games the payoffs are defined as continuous functions, the relationship between economic costs and environmental benefits can be a good

quantitative criterion for measuring which choice identified according to the scenarios of the three policy areas is most effective. Therefore, the model involves a single population and a set S of possible strategies (uses of space) with the intention of calculating which fraction of the agents, which we call the social state, will adopt one or the other strategy. This requires a matrix that associates each welfare state with a set of payoffs F, economic and environmental, for each strategy, allowing us to calculate the overall payoff of the area and the level of decarbonisation. Having identified the strategies, we can say that a welfare state is a Nash equilibrium for the F game if each agent chooses the best response (Izquierdo *et al.*, 2018). Defining a payoff matrix A as in Game Theory, then a ‘population game’ is given by the equation  $F(x)=Ax$  where x is the population state. This

behaviour is iterated until an equilibrium is reached.

<sup>9</sup> The economic benefits due to the production of electricity from PV were calculated, taking into account the savings on the electricity bill compared to the initial configuration, and the economic benefits due to the PDC, considering the zero consumption of gas for heating and the related savings on the bill. For the CO<sub>2</sub> benefits of the PV, the CO<sub>2</sub> cost of the electricity component was subtracted, while for the PDC, the CO<sub>2</sub> cost of the gas component was subtracted from the initial environmental cost and the amount of CO<sub>2</sub> due to the PDC's electricity consumption was added.

risparmio in bolletta. Per i benefici in termini di CO<sub>2</sub> relativi al FV, è stato sottratto il costo in CO<sub>2</sub> della componente elettrica, mentre per la PDC è stato sottratto, rispetto al costo ambientale iniziale, il costo di CO<sub>2</sub> della componente gas e aggiunta la quantità di CO<sub>2</sub> dovuta ai consumi elettrici della PDC.

## REFERENCES

- Achler, G. and Barra, A. (2010), "A numerical investigation of the jamming transition in traffic flow on diluted planar 198 networks", *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 24, pp. 6351-6363.
- Arbara, S. and D'Autilia, R. (2021), "A Population Game Model for the Expansion of Airbnb in the City of Venice", *Sustainability*, Vol. 13(7), p. 3829.
- C40 Knowledge Hub (2020), "How to build back better with a 15-minute city", available at: [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-build-back-better-with-a-15-minute-city?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-build-back-better-with-a-15-minute-city?language=en_US) (accessed on 22/08/2022).
- D'Autilia, R. and Spada, M. (2010) "Extension of Space Syntax Methods to Generic Urban Variables", *Urban Science 2018*, Vol. 196, n. 2, p. 82.
- Droege, P. (2008), *La città rinnovabile. Guida completa ad una rivoluzione urbana*, Edizioni Ambiente.
- Fremouw, M., Bagaini, A. and De Pascali, P. (2020), "Energy potential mapping: Open data in support of urban transition planning", *Energies*, vol. 13(5), pp. 1-15.
- Geneletti, D., Cortinovis, C., Zardo, L. and Blal Adem, E. (2020), *Planning for Ecosystem Services in Cities*, Springer Open, Cham, Switzerland.
- Hirt, S. and Zahm, D. (2014) "The Urban Wisdom of Jane Jacobs", Routledge, available at: <https://doi.org/10.4324/9780203095171> (Accessed on 22/08/2022).
- Izquierdo, L.R., Izquierdo, S.S. and Sandholm, W.H. (2018), "EvoDyn-3s: A Mathematica computable document to analyze evolutionary dynamics in 3-strategy games", *SoftwareX*, Vol. 7, pp. 226-233.
- Liu, Z., Wang, S., Qi Lim, M., Kraft, M. and Wang, X. (2021), "Game theory-based renewable multi-energy system design and subsidy strategy optimization", *Advances in Applied Energy*, Vol. 2, 100024.
- Lo Vullo, E., Muntean, M., Duerr, M., Kona, A. and Bertoldi, P. (2020), "GHG Emission Factors for Electricity Consumption", European Commission, Joint Research Centre, available at: <http://data.europa.eu/89h/919df040-0252-4e4e-ad82-c054896e1641> (accessed on 22/08/2022).
- Marrone, P. and Montella, I. (2022), "An experimentation on the limits and potential of Renewable Energy Communities in the built city: buildings and proximity open spaces for energy decentralization", *Renewable and Sustainable Energy Transition*, Vol. 2.
- Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C. and Pratlong, F., "Introducing the 15-minute city: Sustainability resilience and place identity in future post-pandemic cities", *Smart Cities*, Vol. 4, n. 1, pp. 93-111.
- Sandholm, W.H. (2010), *Population Games and Evolutionary Dynamics*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts London, England.

# Il modello Coast-RiskBySea per il supporto decisionale al progetto climate proof

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

RICERCA E  
Sperimentazione/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION

Maria Fabrizia Clemente, <https://orcid.org/0000-0001-6114-2502>

Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia

[mari fabrizia.clemente@unina.it](mailto:mari fabrizia.clemente@unina.it)

**Abstract.** Gli scenari climatici impongono la messa in campo di azioni climate proof, l'efficacia di tali progetti dipende direttamente dalla conoscenza dei contesti locali e dalle caratteristiche del costruito in rapporto alle condizioni di rischio climatico. Modalità di conoscenza innovative sono attuabili grazie al ricorso alle tecnologie abilitanti. A partire da tali premesse, il contributo, propone il modello Coast-RiskBySea per il supporto decisionale al progetto climate proof in relazione al rischio di inondazione costiera, con l'obiettivo di definire nuove sinergie tra la progettazione ambientale e le tecnologie abilitanti. Il modello proposto è stato testato su un caso applicativo nella città di Napoli simulando un intervento climate proof per valutare l'efficacia di tale soluzione in termini di riduzione dei danni e per definire potenzialità e criticità dell'approccio.

**Parole chiave:** Tecnologie abilitanti; Supporto decisionale; Progetto climate proof; Aree costiere; Coast-RiskBySea.

## Introduzione

Gli insediamenti urbani sono soggetti a molteplici rischi associati a pericoli meteorologici e agli effetti del cambiamento climatico che richiedono strategie di previsione e prevenzione dei rischi, adattamento agli impatti, riduzione delle vulnerabilità e programmazione di misure di mitigazione.

L'attuazione di strategie climate proof, intese come azioni capaci di prefigurare e prevenire eventi critici, richiede la valutazione dei rischi climatici e la lettura del sistema urbano come sistema complesso per il controllo delle continue interazioni morfologiche, funzionali e comportamentali-prestazionali che intercorrono tra i suoi sistemi e sottosistemi (Losasso, 2018).

Per leggere il sistema urbano in chiave sistemica è necessario considerare molteplici informazioni, il supporto delle tecnologie abilitanti consente di attuare modalità di conoscenza e progettuali innovative. Parallelamente, la valutazione dei rischi è affidata ai modelli climatici che supportano i decisori mediante

valutazioni qualitative degli effetti del clima sugli insediamenti urbani.

Nell'ambito della modellistica orientata al supporto decisionale per il progetto climate proof si evidenziano gap conoscitivi in termini dei danni provocati dagli eventi climatici, benefici e costi delle misure progettuali e lacune nelle simulazioni in relazione alle caratteristiche locali del costruito (EC, 2021; Mercogliano *et al.*, 2016). Emerge, quindi, la necessità di integrare i quadri di conoscenza e le stime degli impatti in relazione ai contesti locali mediante processi di downscaling così come la necessità di relazionare i modelli di rischio e impatto con strategie e soluzioni metaprogettuali.

Nello scenario della transizione verde e digitale, il progresso delle città è, quindi, strettamente connesso all'uso delle tecnologie e le Smart Cities si caratterizzano per la loro capacità "smart" di rispondere ai differenti bisogni ambientali, sociali ed economici attuando sia misure di tipo "soft" per la gestione, il controllo e il monitoraggio dell'ambiente urbano, sia misure di tipo "hard", come servizi e infrastrutture, mirando all'equilibrio sistemico tra aspetti socioculturali, ambientali, tecnologici ed economici (Antonini *et al.*, 2018; Ullah *et al.*, 2021).

È in questo contesto che si inserisce la proposta del modello Coast-RiskBySea (COASTal zones RISK assessment for Built environment bY extreme SEA level) per la conoscenza del rischio di inondazione costiera orientata al supporto decisionale del progetto climate proof.

La ricerca presentata è maturata nell'ambito di un Dottorato innovativo a caratterizzazione industriale che, in linea con gli obiettivi della Comunità Europea, si è posto l'obiettivo di definire nuove sinergie tra la progettazione ambientale e le tecno-

## The Coast-RiskBySea model for climate proof decision-making support

**Abstract.** Climate scenarios require the implementation of climate proof actions. The effectiveness of such projects directly depends on the knowledge of local contexts and on the built environment's characteristics in relation to climate risk conditions. Innovative methods of knowledge can be implemented through the use of enabling technologies. Based on these considerations, the paper proposes the Coast-RiskBySea model as support for climate proof decision-making in relation to coastal flood risk, with the aim of developing new synergies between environmental design and enabling technologies. The proposed model was tested on an application case in the city of Naples by simulating a climate proof measure to assess the effectiveness of this solution in terms of damage reduction, and to define the potential and criticality of the approach.

**Keywords:** Key Enabling Technologies; Decision-making support; Climate proof design; Coastal areas; Coast-RiskBySea.

## Introduction

Urban settlements are subject to multiple risks associated with meteorological hazards and to the effects of climate change that require strategies for hazard prediction and prevention, adaptation to impacts, vulnerability reduction and planning of mitigation measures. The implementation of climate-proof strategies, defined as actions able to prefigure and prevent critical events, requires the assessment of climate risks and the interpretation of the urban system as a complex system to manage the continuous morphological, functional, and behavioural-performance interactions between its systems and subsystems (Losasso, 2018).

To analyse the urban system holistically, it is necessary to consider multiple information. The support of enabling technologies allows the implementation of innovative knowledge and design methods. At the same time, risk assessment is performed by climate models that support decision-makers through qualitative assessments of climate effects on the urban environment. Within the framework of decision-making support modelling for climate proof design, there are knowledge gaps in terms of climate-related damages, benefits, and costs of design measures, as well as gaps in simulations concerning the local characteristics of the built environment (EC, 2021; Mercogliano *et al.*, 2016). Thus, the necessity emerges to integrate knowledge frameworks and impact assessments in relation to local contexts through downscaling processes, as well as the need to relate

logie abilitanti. Il contributo si focalizza sulla sperimentazione del modello Coast-RiskBySea nella fase di supporto al progetto, precedenti lavori approfondiscono il workflow, l'applicabilità e l'accuratezza delle simulazioni (Clemente *et al.*, 2022), così come la replicabilità (Clemente, 2022).

### Il modello Coast-RiskBySea per la valutazione degli impatti delle inondazioni costiere sull'ambiente urbano

ESL fornisce informazioni in grado di orientare il progetto in chiave climate proof attraverso la conoscenza e la caratterizzazione degli aspetti di esposizione, vulnerabilità e hazard alla scala locale.

Il ricorso alle tecnologie abilitanti consente di supportare il progetto in termini processuali e operativi e, in questo contesto, è possibile identificare quattro categorie di strumenti: gli strumenti GIS, i software BIM, gli strumenti di simulazione energetico-ambientale e il linguaggio computazionale (Tersigni, 2018). Tra questi, gli strumenti GIS risultano ottimali per la gestione dei dati permettendo di strutturare la "knowledge base" necessaria per la valutazione dei rischi (Di Martino and Sessa, 2016).

La ricerca, seguendo un approccio sistematico, multiscalar e multidisciplinare è stata strutturata in tre fasi: analitico/conoscitiva, sintetico/ comparativa e sperimentale. Nella fase analitico/conoscitiva è stato approfondito lo stato dell'arte per perimetrazione il campo d'indagine. La fase sintetico/comparativa ha

Nelle aree costiere euro-mediterranee gli eventi di "Extreme Sea Level" (ESL)<sup>1</sup> saranno sempre più frequenti ed intensi. La valutazione del rischio di inondazioni costiere per eventi di

condotto da un lato, alla proposta del modello Coast-RiskBySea per la conoscenza e la valutazione del rischio di inondazione costiera e, dall'altro alla costruzione di un catalogo di soluzioni metaprogettuali climate proof. Nella fase sperimentale, il modello è stato testato sulla città di Napoli (Italia) come strumento di supporto decisionale per verificare le potenzialità e l'affidabilità dell'approccio e metterne in evidenza i limiti e le prospettive di sviluppo.

Sebbene per ciò che concerne la valutazione dei danni il modello è stato oggetto di precedenti pubblicazioni (Clemente, 2022; Clemente *et al.*, 2022), sinteticamente, se ne riportano le principali caratteristiche e le fasi operative al fine di comprenderne il potenziale contributo offerto al supporto progettuale.

Il modello Coast-RiskBySea è elaborato in ambiente GIS e il rischio è parametrizzato in funzione dei potenziali danni economici ai fenomeni di inondazione costiera sull'ambiente costruito. I danni, diretti e tangibili, sono calcolati su unità di campionamento esagonali omogenee e regolari; il rischio, seguendo il framework dell'IPCC nei report AR5 e AR6, è valutato in funzione di esposizione, vulnerabilità ed hazard. L'esposizione è calcolata a partire dai dati di land use Copernicus Coastal Zones 2018 combinati con le funzioni di danno del Joint Research Centre (JRC) dell'Unione Europea (le global depth-damage functions) ai fini del calcolo del valore esposto. Come vulnerabilità è considerata l'elevazione altimetrica media rispetto al livello del mare ricavata dal modello digitale del terreno (DTM). Per hazard sono considerati gli eventi di ESL, le proiezioni climatiche sono anch'esse ricavate nell'ambito delle banche dati del JRC. Tutti i dati sono open-source e caratterizzati da copertura spaziale omogenea a livello europeo permettendo la replicabilità

risk and impact models with metadesign strategies and solutions.

In the scenario of the green and digital transition, the progress of cities is, therefore, closely linked to the use of technologies. Smart Cities are characterised by their "smart" ability to respond to different environmental, social, and economic issues by implementing both "soft" measures to manage, control and monitor the urban environment, and "hard" measures, such as services and infrastructure, aiming at achieving systemic balance between socio-cultural, environmental, technological and economic aspects (Antonini *et al.*, 2018; Ullah *et al.*, 2021).

It is in this context that the research proposes the Coast-RiskBySea model (COASTal zones RISK assessment for Built environment bY extreme SEA level) for the knowledge of coastal flood risk oriented to the decision-

making support of the climate proof project.

The research presented was carried out as part of an innovative PhD programme with an industrial approach, which, in line with the objectives of the European Community, was aimed at defining new synergies between environmental design and enabling technologies. The paper focuses on the test of the Coast-RiskBySea model in the design-making support phase. Previous work investigates workflow, applicability, and accuracy of simulations (Clemente *et al.*, 2022), as well as transferability (Clemente, 2022).

#### The Coast-RiskBySea model to assess the impacts of coastal floods on the urban environment

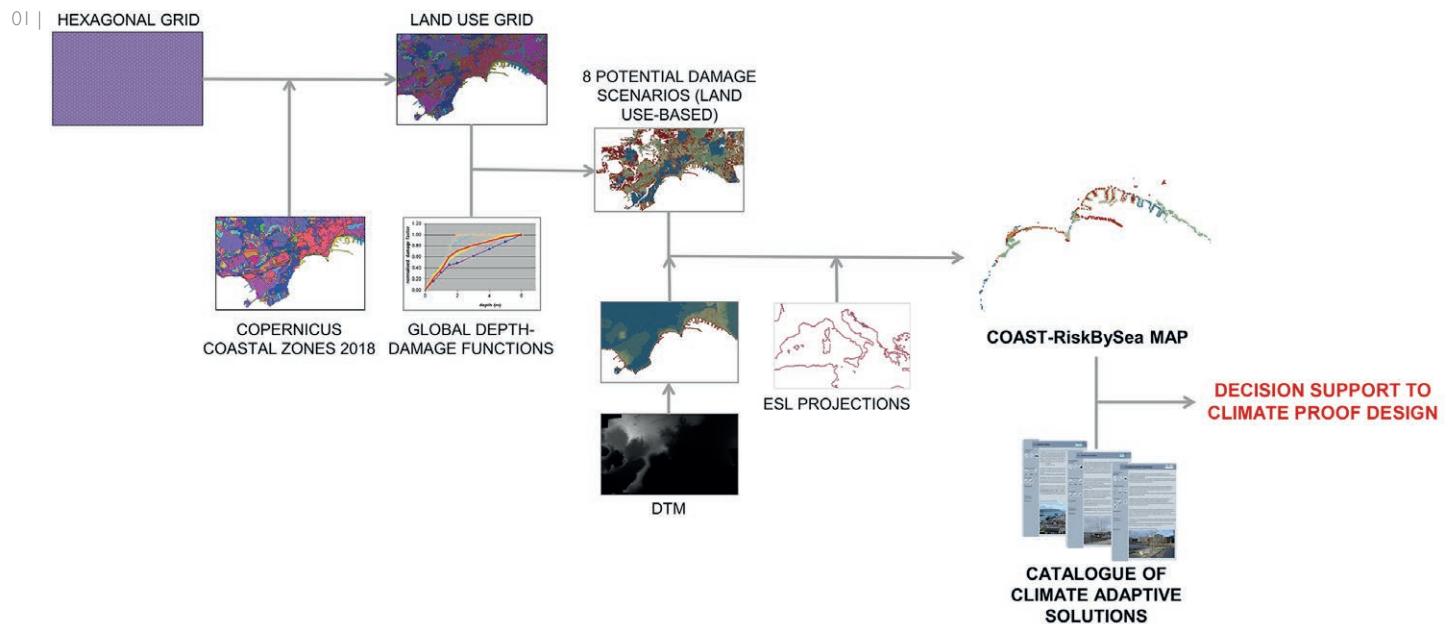
Extreme Sea Level (ESL)<sup>1</sup> events will be increasingly frequent and intense in the Euro-Mediterranean coastal areas.

The assessment of coastal flood risk due to ESL events provides information that can orientate climate proof design through knowledge and characterisation of exposure, vulnerability and hazard features at the local scale. The use of enabling technologies allows to support the project in both procedural and operational terms and, in this context, four categories of tools can be identified: GIS (Geographic Information Systems) tools, BIM (Building Information Modelling) software, energy-environmental simulation tools, and computational language (Tersigni, 2018). Among these, GIS tools are most suitable for data management, enabling the construction of the "knowledge base required for risk assessment (Di Martino and Sessa, 2016).

The research, following a systemic, multi-scalar and multi-disciplinary

approach, was structured in three phases: analytical/cognitive, synthetic/comparative and experimental. In the analytical/cognitive phase, the state of the art was investigated to define the investigation's perimeter. The synthetic/comparative phase led, on the one hand, to the proposal of the Coast-RiskBySea model for the observation and knowledge of coastal flood risk and, on the other hand, to the construction of a catalogue of climate proof metadesign solutions. In the experimental phase, the model was tested in the city of Naples (Italy) as a decision-making support tool to verify the potential and reliability of the approach, and to highlight its limitations and development perspectives.

Although the model has been the subject of previous publications regarding damage assessment (Clemente, 2022; Clemente *et al.*, 2022), briefly, its main



tà anche in altri contesti. Il contributo delle tecnologie abilitanti diventa necessario per la gestione multiscalare dei dati e per svolgere operazioni complesse in tempi contenuti. Individuati le aree a rischio e il grado di rischio correlato, per fornire uno strumento di supporto decisionale nella fase metaprogettuale finalizzato al progetto ambientale alla scala locale, il modello Coast-RiskBySea è associato ad un catalogo di soluzioni metaprogettuali climate proof. La metaprogettazione consente, infatti, di individuare criteri e requisiti del sistema tecnologico-ambientale finalizzati alla proposta di variazioni progettuali con scenari diversi; i cataloghi di soluzioni rappresentano uno strumento di azione decisionale progressiva, supportando il passaggio dalla fase analitica a quella progettuale (Tucci et al., 2021).

characteristics and operational steps are reported to understand its potential contribution to design support. The Coast-RiskBySea model is processed in a GIS environment, and the risk is parameterised according to the potential economic damages due to coastal flooding events on the built environment. Damages, both direct and tangible, are calculated on hexagonal homogeneous and regular sampling units. Risk, following the IPCC framework in the AR5 and AR6 reports, is assessed as a function of exposure, vulnerability, and hazard. Exposure is calculated from the land use Copernicus Coastal Zones 2018 database combined with damage functions of the European Union's Joint Research Centre (JRC) (the global depth-damage functions) to compute the exposed value. The mean elevation above sea level obtained from the Digital Terrain

Model (DTM) is considered as vulnerability. ESL events are considered as hazard, while climate projections are also derived from the JRC databases. All data are obtained online and in open-source format, and are characterised by homogeneous spatial coverage across Europe, thus allowing the application of the model in all coastal territories of the European Union. The contribution of enabling technologies becomes essential for multiscale management of data, and to perform complex operations in a short time. Once the areas at risk and the related degree of risk have been identified, to provide decision-making support in the metadesign phase finalised at environmental design at the local scale, the Coast-RiskBySea model is related to a catalogue of climate proof metadesign solutions. Metadesign allows the identification

Il workflow è riportato in figura (Fig. 1).

### Il modello Coast-RiskBySea per il supporto al progetto climate proof

Nell'ambito della proposta del modello Coast-RiskBySea, il catalogo di soluzioni metaprogettuali climate proof è costruito a partire dalla schedatura delle soluzioni individuate nella letteratura scientifica di riferimento e dall'analisi di buone pratiche progettuali nazionali ed internazionali. Le soluzioni individuate sono classificate in funzione delle strategie introdotte per contrastare il fenomeno delle inondazioni costiere e, quindi, in misure che agiscono per: difesa, adeguamento o delocalizzazione (IPCC CZM, 1990). Per ogni soluzione è stata costruita una scheda informativa articolata in due

of criteria and requirements of the technological-environmental system to propose design alternatives based on different scenarios. Solution catalogues are a tool for incremental decision-making processes, supporting the transition from the preliminary phase to the formalisation and synthesis phase and, therefore, from the analytical to the design phase (Tucci et al., 2021).

The workflow is shown in the figure (Fig. 1).

### The Coast-RiskBySea model to support the climate proof project

In the framework of the Coast-RiskBySea model proposal, the catalogue of climate proof metadesign solutions is developed based on the inventory of solutions identified in the scientific reference literature and on the analysis of national and international best practices (Valente, 2020), and the type of measure by identifying grey/infrastructural

The solutions identified are classified according to the strategies introduced to contrast the coastal flood phenomenon and, therefore, in measures acting for: defence, accommodation or delocalisation (IPCC CZM, 1990). For each solution, an information sheet was structured in two sections. In the first the solutions are briefly described according to six homogeneous and recurring blocks of information that identify their main aspects (main characteristics, climate targets, co-benefits, economic indications, applicability and, references); in the second, typical solutions are identified and graphically schematised. The main characteristics include the scale of the intervention by identifying regional/city, district/neighbourhood and block/building scale solutions (Valente, 2020), and the type of measure by identifying grey/infrastructural

sezioni, nella prima le soluzioni sono descritte, sinteticamente, in funzione di sei blocchi di informazioni omogenee e ricorrenti che ne individuano i principali aspetti (caratteristiche principali, targets climatici, co-benefits, indicazioni economiche, applicabilità e riferimenti progettuali), nella seconda sono individuate e schematizzate graficamente le soluzioni-tipo. Tra le caratteristiche principali si evidenziano la scala d'intervento che identifica soluzioni a scala di regione/città, distretto/quartiere e blocco/edificio (Valente, 2020) e la tipologia di azione individuando soluzioni grigie/infrastrutturali e tecnologiche, verdi/ basate su un approccio ecosistemico e soft/non strutturali (MATTM, 2014). La relazione tra il modello di rischio e il set di soluzioni è costruita in ambiente GIS mediante un collegamento ipertestuale che rimanda alle schede tecniche in formato pdf. Tale relazione si basa sull'applicabilità delle soluzioni definita a partire dalle informazioni contenute nelle unità di campionamento in forma di attributi spaziali. L'applicabilità di una o più soluzioni è costruita in forma matriciale a partire da indagini deduttive condotte sulla letteratura scientifica di riferimento e dall'analisi di casi studio nazionali ed internazionali e varia in base alle caratteristiche locali. In prima istanza, è identificata in funzione delle classi d'uso del suolo e, quindi, in base all'esposizione classificata secondo l'indicatore di land use che considera sia la destinazione d'uso che la tipologia e la densità del tessuto urbano. Individuate le alternative metaprogettuali, il catalogo delle soluzioni può essere parametrizzato dai decisori in funzione dei criteri caratterizzanti del progetto identificando: tipologia di misura (grigia, verde e/o soft) e scala d'intervento (regione/città, distretto/quartiere e/o blocco/edificio). Tale parametrizzazione permette di compiere una prima selezione delle soluzioni;

and technological, green/ecosystem-based and soft/non-structural solutions (MATTM, 2014).

The association between the risk model and the set of climate proof solutions is structured in GIS by a hyperlink that connects to the technical sheets in pdf format. This relationship is based on the applicability of the solution settled on the information contained in the sampling units in form of spatial attributes. The applicability of one or more solutions is structured in matrix form based on deductive research in the reference scientific literature, and on the analysis of national and international case studies, and varies according to local characteristics. In the first instance, it is identified according to land use classes and, therefore, according to the exposure classified by the land use indicator that considers use, type, and density of the urban fabric.

Once the metadesign alternatives have been identified, the catalogue of solutions can be parameterised by the decision-makers according to the criteria that characterise the project, identifying: type of action (grey, green and/or soft) and scale (region/city, district/neighbourhood and/or block/building). This parameterisation permits an initial selection of solutions; however, it does not take into account the many potential regulatory, economic or social limitations.

#### A case study on the city of Naples

To test the efficiency of the Coast-Risk-BySea model as an information and consultation tool for design alternatives, the application of a climate proof solution for the city of Naples was simulated. Following the framework identified by the IPCC in the AR5 report (Noble *et al.*, 2014), the decision-

tuttavia, non tiene in considerazione i molteplici potenziali vincoli di natura normativa, economica o sociale.

#### Un caso applicativo sulla città di Napoli

Ai fini sperimentali, per verificare l'efficacia del modello Coast-RiskBySea come strumento

di informazione e consultazione delle alternative progettuali, è stato simulato un intervento sulla città di Napoli. Seguendo il framework individuato dall'IPCC nel report AR5 (Noble *et al.*, 2014), il processo decisionale è stato articolato in quattro fasi:

1. Identificazione dell'area d'intervento;
2. consultazione delle alternative progettuali (catalogo delle soluzioni meta-progettuali climate proof);
3. definizione dell'approccio progettuale (tipologia di azione e scala d'intervento), parametrizzazione del catalogo e identificazione delle soluzioni;
4. simulazione dell'intervento climate proof e valutazione della riduzione dei danni.

L'applicazione sperimentale è stata condotta considerando un evento di ESL al 2100 caratterizzato da scenario RCP 8.5, tempo di ritorno 100 anni e 95esimo percentile, considerando, quindi il caso peggiore. Dalle simulazioni (Clemente *et al.*, 2022) è stata individuata come area particolarmente critica l'area di via F. Caracciolo<sup>2</sup> una delle principali arterie stradali di Napoli.

Ad ogni unità spaziale è quindi associato un set di soluzioni in base alle informazioni contenute in forma di attributi spaziali. Le alternative metaprogettuali sono individuate nell'ambito del catalogo delle soluzioni e, come anticipato, sono classificate in base alla principale strategia introdotta per il contrasto ai fenomeni di inondazione costiera (Fig. 2).

making process was articulated in four phases:

1. identification of the risk area;
2. consultation of design alternatives (catalogue of climate proof metadesign solutions);
3. definition of the design approach (type of action and scale of intervention), parameterisation of the catalogue and identification of solutions;
4. simulation of the climate proof solution and assessment of damage reduction.

The test was conducted considering an ESL event at 2100 characterised by RCP 8.5 scenario, return period 100 years, and 95th percentile, thus considering the worst case. From the simulations (Clemente *et al.*, 2022), the area of via F. Caracciolo<sup>2</sup>, one of the main roads of Naples, was identified as a critical area.

A set of solutions based on the information included in the form of spatial attributes is then associated to each spatial unit. The metadesign alternatives are identified within the solutions catalogue and, as mentioned above, are classified according to the main strategy introduced to contrast coastal floods (Fig. 2). Among the identified solutions, those based on an ecosystem approach relating to the district/neighbourhood scale and performing according to a defence approach have been selected as a demonstration.

For demonstration purposes, among the identified solutions, a selection was made of those characterised by a green/ecosystem approach, relating to the district/neighbourhood scale and acting according to a defence approach. Without considering technical aspects, regulatory and/or socio-economic constraints, the coastal parks/

Ai fini dimostrativi, tra le soluzioni individuate, sono state selezionate quelle basate su un approccio ecosistemico, che si relazionano con la scala del distretto/quartiere e che agiscono secondo un approccio di difesa. Senza tenere in considerazione aspetti tecnici, vincoli normativi e/o socioeconomici è stata selezionata e applicata la soluzione parchi costieri/aree verdi. Un recente esempio di questo tipo di soluzione è l'Hudson River park a New York (Fig. 3).

Prevedere aree verdi nelle aree costiere consente di ridurre gli impatti delle inondazioni sull'ambiente costruito mediante la creazione di una buffer zone tra l'acqua e gli elementi esposti. I parchi urbani sono concepiti per essere inondati riportando danni minimi data l'alta percentuale di superficie permeabile; l'efficacia dipende direttamente dall'estensione superficiale.

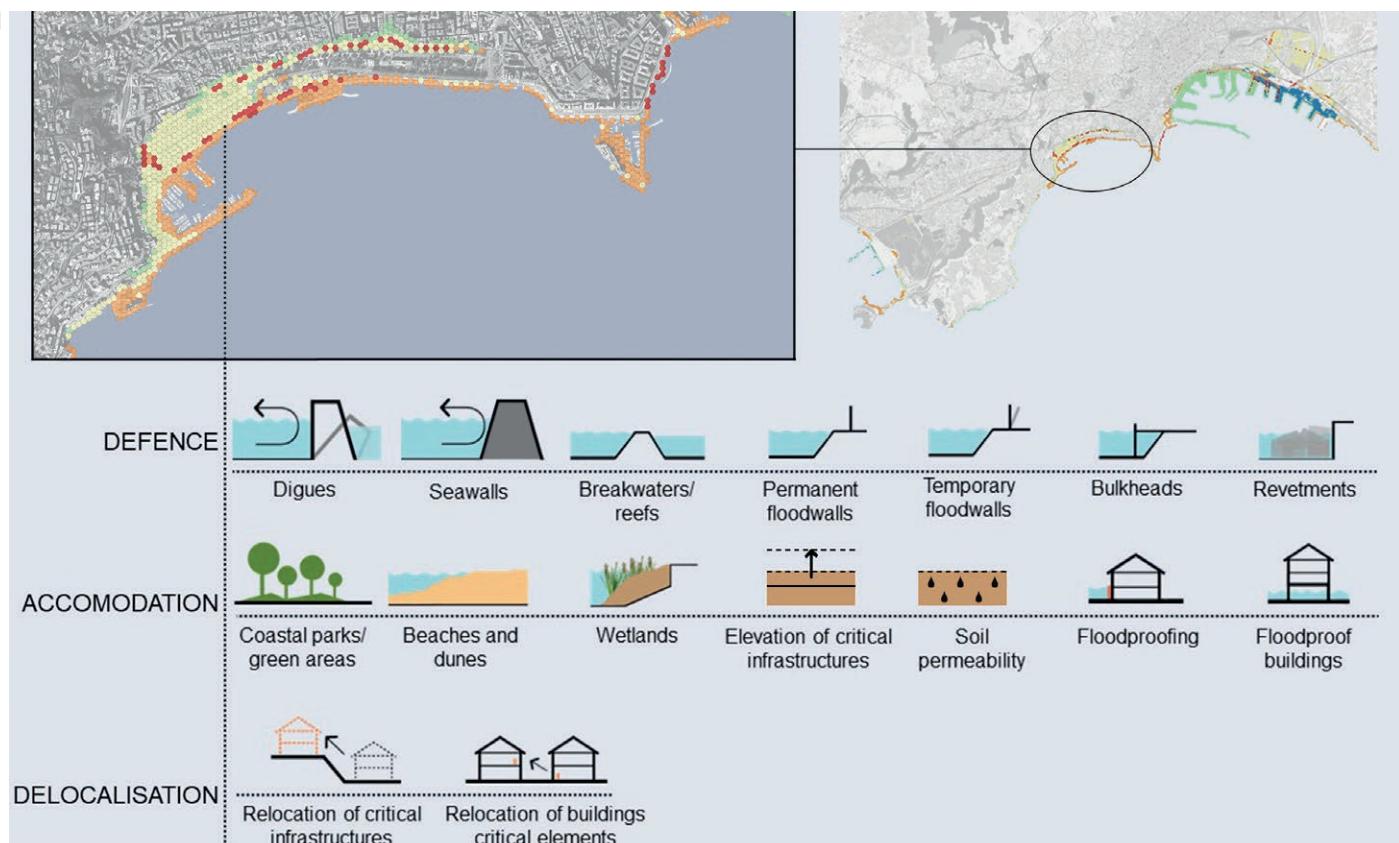
La simulazione sul caso studio evidenzia una riduzione dei potenziali danni economici diretti e tangibili sull'ambiente costruito fino a 2,3M € per eventi di ESL al 2100 (Fig. 4). Oltre ai benefit climatici diretti rispetto al fenomeno di inondazione costiera, la soluzione consente di ridurre anche gli impatti per eventi di inondazione pluviale grazie all'alta permeabilità delle superfici che consente una riduzione del run-off superficiale, e degli impatti ai fenomeni di ondata di calore. Per incrementale

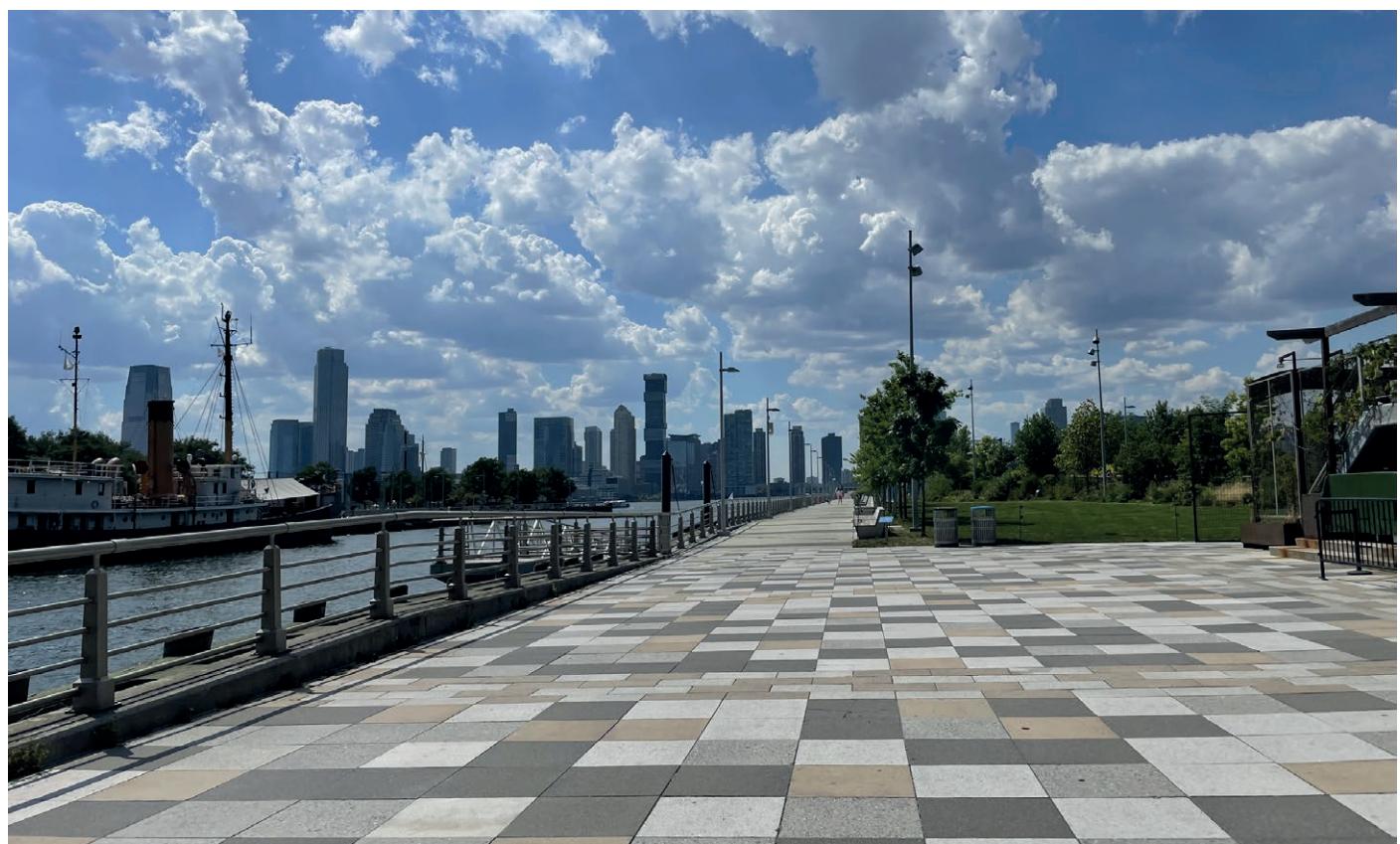
anche la protezione ai fenomeni di erosione costiera è possibile armare la riva, inserire elementi di protezione o di stabilizzazione del terreno. In aggiunta molteplici sono i co-benefits offerti sul piano ambientale, sociale ed economico.

La simulazione presentata intende porsi come progetto dimostratore senza tenere in considerazione i numerosi vincoli che caratterizzano l'area; ad esempio, nel caso in esame, è necessario considerare il valore storico dell'area che rientra nel perimetro UNESCO, così come la necessità di considerare soluzioni di tipo soft per la delocalizzazione della strada. Infatti, sebbene il contributo delle tecnologie abilitanti consenta di avviare processi progettuali innovativi, il ruolo del progettista rimane centrale e il progetto deve essere inteso come uno strumento di ricerca e non di problem solving (Maldonado, 1970).

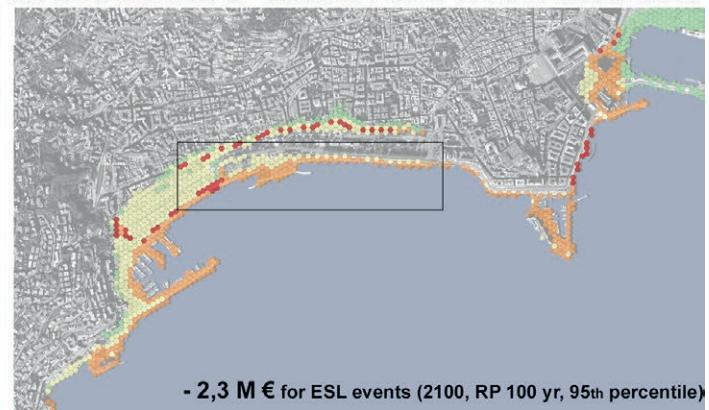
Attualmente l'efficacia delle soluzioni climate proof presenti nel catalogo, in termini di riduzione dei danni sul piano spaziale ed economico ai fenomeni di inondazione costiera, è testabile solo per alcune soluzioni, ulteriori implementazioni sono necessarie per integrare modalità computazionali per la riduzione dei danni mediante l'introduzione di coefficienti o l'integrazione di funzioni site-specific e saranno oggetto di sperimentazioni future.

02 |





| 03

**STATE OF THE ART****IMPLEMENTATION OF CLIMATE PROOF DESIGN STRATEGIES**

| 04

green areas solution was selected and applied. A recent example of this type of solution is the Hudson River Park in New York (Fig. 3).

Designing green zones in coastal areas reduces the impacts of flooding on the built environment by creating a buffer zone between water and exposed elements. Urban parks are designed to be flooded with minimal damage due

to their high percentage of permeable surface area; the efficacy directly depends on the size of the surface area. The simulation on the case study shows a reduction in potential direct and tangible economic damages to the built environment up to 2.3M € for ESL events by 2100 (Fig. 4). In addition to the direct climatic benefits against coastal flooding, the solution also reduces the

impacts of pluvial flooding due to the high permeability of the surfaces, which allows the reduction of surface run-off, and of impacts caused by heat waves. To also increase the protection against coastal erosion, the shoreline can be armoured, and protection or stabilisation elements can be included. In addition, there are many co-benefits in environmental, social and economic terms.

The simulation presented is conceived as a demonstrator project without taking into consideration the numerous constraints that characterise the area; for example, in the case presented, it is necessary to consider the historical value of the area, which is part of the UNESCO perimeter, as well as the need to consider soft solutions to the relocation of the road.

## Conclusioni

L'utilizzo di tecnologie abilitanti consente di avviare processi metodologici e procedurali innovativi nel campo della green economy e, in particolare, nel supporto orientato alla gestione del rischio climatico, sviluppando soluzioni e strategie climate proof. L'efficacia dei progetti richiede lo sviluppo di modelli di conoscenza e processi innovativi atti ad orientare la trasformazione dell'ambiente costruito tenendo in considerazione le molteplici istanze del progetto urbano, includendo aspetti ecosistemici, sociali ed economici.

In questo scenario il modello Coast-RiskBySea si avvale di strumenti di modellazione e simulazione, machine learning e gestione dei dati per fornire supporto nell'ambito del progetto climate proof ai fenomeni di inondazione costiera.

I principali destinatari della ricerca sono i decisori chiamati ad operare in scenari di criticità climatiche. Aspetti innovativi del modello Coast-RiskBySea risiedono sia nel processo che negli strumenti utilizzati che hanno consentito un downscaling dell'analisi degli impatti alla scala locale rispetto ai modelli presenti in letteratura grazie alla caratterizzazione degli aspetti di hazard, vulnerabilità ed esposizione in relazione alle caratteristiche del costruito. Altri aspetti innovativi riguardano la parametrizzazione dei rischi in funzione dei potenziali danni economici e la relazione tra il modello di rischio e il catalogo di soluzioni climate proof che consente di fornire un quadro sintetico per il passaggio dalla fase istruttoria a quella operativa. L'utilizzo di dati open source e omogenei a livello europeo in ambiente GIS ha, inoltre, permesso di sviluppare un modello che può supportare i decisori delle aree con limitata disponibilità di dati, senza dover ricorrere ad ingenti investimenti economici.

Currently, the efficacy of climate proof solutions in the catalogue, in terms of spatial and economic damage reduction, can only be tested for some solutions. Further implementations are necessary to integrate computational methods to reduce damage through the introduction of coefficients or the integration of site-specific functions, and will be the subject of future experimentations. Indeed, although the contribution of enabling technologies allows innovative design processes, the role of the architect remains central, and the project must be intended as a research tool and not as a problem-solving exercise (Maldonado, 1970).

## Conclusions

The use of enabling technologies makes it possible to initiate innovative methodological and procedural processes in the field of green economy

L'utilizzo di tecnologie abilitanti consente di avviare processi

La sperimentazione condotta sulla città di Napoli, a partire dall'individuazione dell'area a rischio e del grado di rischio correlato, si è concentrata sull'applicazione di una soluzione metaprogettuale che, modificando gli indicatori di vulnerabilità ed esposizione, ha consentito di testare la riduzione del rischio e dei conseguenti danni economici associati.

Il test ha evidenziato le potenzialità dell'approccio che, integrando strumenti e approcci di AI (Artificial Intelligence) per implementare il modello nella verifica dell'efficacia di tutte le soluzioni presenti nel catalogo e per migliorare il contributo al progetto site-specific tenendo in considerazione gli aspetti ambientali, sociali ed economici, potrebbe diventare un prodotto/servizio per decisori pubblici o privati<sup>3</sup>.

## NOTE

<sup>0</sup> L'articolo, i cui proponenti sono ricercatori under 35, dopo aver superato la fase di accettazione dell'abstract e il successivo referaggio effettuato con modalità "double blind", ha ottenuto, da parte del Board di Techne, una valutazione meritevole per la sua pubblicazione con la logica No-Pay.

<sup>1</sup> Per evento di "Extreme Sea Level" si intende un evento di inondazione costiera che considera sia la componente graduale di innalzamento del livello del mare che improvvisa come le onde da vento.

<sup>2</sup> Via Francesco Caracciolo è un'ampia promenade parallela alla Villa Comunale e al mare, fu realizzata a seguito della colmata delle antiche spiagge. Per il contrasto ai fenomeni di inondazione sono presenti scogliere radenti, sistemi di rivestimento e barriere emergenti.

<sup>3</sup> La proposta nell'ambito della competition Copernicus Masters 2022 ha vinto una menzione nell'ambito del Regional Prize Italy.

and, in particular, in supporting climate risk management by developing climate-proof solutions and strategies. Design efficacy requires the development of knowledge models and innovative processes to support the adaptation of the built environment, taking into account the multiple instances of urban development, including ecosystem, social and economic aspects. In this scenario, the Coast-RiskBySea model relies on modelling and simulation tools, machine learning and data management to provide support against coastal floods within project climate proof. The research's main target audience comprises decision-makers working in critical climate scenarios. Innovative aspects of the Coast-RiskBySea model lie both in the process and in the tools used, which allowed downscaling of the analysis of impacts to the local scale,

compared to models found in the literature, by characterising the aspects of hazard, vulnerability and exposure in relation to the characteristics of the built environment. Other innovative aspects concern the parameterisation of risks in function of potential economic damage, and the relationship between the risk model and the catalogue of climate proof solutions, which allows a synthetic framework to move from the assessment to the operational phase. The use of open source and homogeneous data at European level in a GIS environment has also allowed the development of a model that can support decision-makers in areas with limited data availability, without the need for large economic investments.

The test highlighted the potential of the approach, which could become a product/service to support public or private decision-makers through the integration of AI (Artificial Intelligence) tools and approaches to implement the model in order to verify the efficacy of all the proposed solutions in the catalogue, and to improve the site-specific design contribution, taking into account environmental, social and economic aspects<sup>3</sup>.

## NOTES

<sup>0</sup> The article, whose proponents are researchers under 35, after having passed the abstract acceptance phase

## REFERENCES

- Antonini, E., Mussinelli, E. (2018), "Toward the smart city and beyond", *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, special series Vol. 1, pp. 26-27.
- Clemente, M. F. (2022), "The Future Impacts of ESL Events in Euro-Mediterranean Coastal Cities: The Coast-RiskBySea Model to Assess the Potential Economic Damages in Naples, Marseille and Barcelona", *Sustainability*, Vol. 14.
- Clemente, M. F., D'Ambrosio, V. and Focareta, M. (2022), "The proposal of the Coast-RiskBySea: COASTal zones RISK assessment for Built environment bY extreme SEA level, based on the new Copernicus Coastal Zones data", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 75.
- Di Martino, F., Sessa, S. (2016), "Processi di analisi spaziale per la gestione della conoscenza/Spatial analysis processes to manage the knowledge" in D'Ambrosio, V., Leone, M. F. (Ed.), *Progettazione ambientale per l'adattamento al Climate Change - 1. Modelli innovativi per la produzione di conoscenza*, Clean Edizioni, Naples, pp. 58-69.
- EC (2021), *Impact Assessment Report The new EU Strategy on Adaptation to Climate Change SWD/2021/25 final*.
- Losasso, M. (2018), "Progetto, Ambiente, Resilienza | Design, Environment, Resilience", *TECHNE Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 15, pp. 16-20.
- Maldonado T. (1970), "La speranza progettuale", Einaudi edizioni.
- Mercogliano, P., Rianna, G. and Zollo, C. (2016), "Scenari di cambiamento climatico su aree urbane: problematiche di downscaling", in D'Ambrosio, V., Leone, M. F. (Ed.), *Progettazione ambientale per l'adattamento al Climate Change - 1. Modelli innovativi per la produzione di conoscenza*, Clean Edizioni, Naples, pp. 208-217.
- MATTM (2014), Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
- Noble, I.R., Huq S., Anokhin, Y.A., Carmin, J., Goudon, D., Lansigan, F.P. et al. (2014), "Adaptation needs and options" in Field CB et al. (Ed.), *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, pp 833-868.
- Tersigni, E. (2018), "Simulare e misurare il progetto resiliente", in Leone M., Tersigni E. (Ed.), *Progetto resiliente e adattamento climatico. Metodologie, soluzioni progettuali e tecnologie digitali*, Clean, Naples, pp. 74-93.
- Tucci, F., Ceccafosso V. and Turchetti G. (2021), "La multiscalarità degli interventi di adattamento climatico" in Bologna, R., Losasso, M., Mussinelli, E., Tucci, F. (Eds.), *Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici e progetti pilota per l'adattamento climatico*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN), pp. 61-67.
- Ullah, F., Qayyum, S., Thaheem, M., Jamaluddin, Al-Turjman, F. and Sepagozar, S. (2021) "Risk management in sustainable smart cities governance: A TOE framework.", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 167.
- Valente, R. (2020) "Esperienze di progetti ambientali multiscalarì", in Losasso, M., Lucarelli, M.T., Rigillo, M., Valente, R. (Ed.), *Adattarsi al clima che cambia*, Collana Studi e Progetti, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN), pp. 262-266.

and the subsequent refereeing carried out in a "double blind" mode, obtained from the Techne Board a deserving evaluation for its publication with the No-Pay logic.

<sup>1</sup> An 'Extreme Sea Level' event is defined as a coastal flood event that considers both the gradual component of rising sea level and the sudden component, such as wind waves.

<sup>2</sup> Via Francesco Caracciolo is a wide promenade that runs parallel to the Villa Comunale and the sea. It was built by filling up the old beaches. To prevent inundations, there is a series of sea cliffs, revetment systems and emerging barriers.

<sup>3</sup> The proposal in the Copernicus Masters competition 2022 won a mention in the Regional Prize Italy.

# Dal CFD al GIS: una metodologia per l'implementazione di database georeferenziati sul microclima urbano

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

RICERCA E  
Sperimentazione/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION  
Ricerca avanzata (Under 35)

Matteo Trane<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-9503-4681>  
Guglielmo Ricciardi<sup>2,3</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-5294-7499>  
Mattia Scalas<sup>1,4</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-6912-1287>  
Marta Ellena<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-3272-556X>

<sup>1</sup> Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio, Politecnico di Torino, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

<sup>3</sup> Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) Foundation, Regional Model and Geo-Hydrological Impacts (REMH) Division, Italia

<sup>4</sup> Responsible Risk Resilience Centre (R3C), Politecnico di Torino, Italia

matteo.trane@polito.it  
guglielmo.ricciardi@polito.it  
mattia.scalas@polito.it  
marta.ellena@cmcc.it

**Abstract.** L'obiettivo del contributo è quello di presentare una metodologia per l'integrazione tra ambiente di simulazione microclimatica Computazionale Fluido-dinamica (CFD) e Sistema Informativo Geografico (GIS). Il primo workflow prevede l'attribuzione delle coordinate spaziali ai dati puntuali estratti dal CFD; l'implementazione di un database SQLite; il collegamento al database per la visualizzazione delle informazioni su variabili ambientali e di comfort. Il secondo workflow prevede la georeferenziazione dell'output raster CFD; l'attribuzione di un ID ai dati puntuali; la creazione di una griglia di punti in ambiente GIS; l'unione tra questa e i dati puntuali sul microclima. A scopo dimostrativo la metodologia viene testata su un caso studio reale attraverso l'utilizzo di ENVI-met e ArcGIS Pro.

Parole chiave: Microclima urbano; CFD; ENVI-met; GIS; Interoperabilità.

## Introduzione

Le ricerche nel campo della climatologia urbana costituiscono un filone di studi consolidato nell'ambito della progettazione ambientale. Molti sono infatti gli elementi che simultaneamente concorrono a caratterizzare il clima alla scala locale (con una risoluzione da 50 m a 100 km) e micro-urbana (da 1 cm a 1 km) (Oke, 1987). La variazione della direzione e intensità del vento, della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa (Lobaccaro *et al.*, 2021) e della qualità dell'aria in generale concorrono a informare il progetto della città, nella prospettiva per cui questo diventi fattore di mitigazione dell'Isola di Calore Urbana. L'incidenza delle caratteristiche dell'ambiente costruito (legate

a densità e forma urbana, orientamento e posizionamento degli edifici, qualità di materiali superficiali e presenza di servizi ecosistemici) sulla definizione del comfort per l'utente e in risposta ad un clima in rapido mutamento è stata ampiamente dibattuta in letteratura (Losasso *et al.*, 2021; Pollo *et al.*, 2020).

La rapida diffusione delle tecnologie abilitanti, con il conseguente incremento delle capacità di calcolo, ridefinisce la prassi progettuale a favore di approcci computazionali, che necessitano di interoperabilità, modellabilità, simulazione e connessione (Tucci, 2020). Nell'ambito del progetto dello spazio aperto, i modelli numerici Computazionali Fluido-Dinamici (CFD), in particolare, consentono la simulazione delle principali variabili ambientali e di comfort fino ad una risoluzione inferiore a 1 m, fornendo supporto scientifico a figure professionali e *decision-maker* per la valutazione *ex-ante* ed *ex-post* degli scenari di trasformazione urbana. D'altro canto, la gestione delle simulazioni a questa scala di risoluzione richiede un alto grado di specializzazione. Inoltre, i dati prodotti sono raramente accessibili e difficilmente utilizzabili al di fuori dell'ambiente di simulazione, come, ad esempio, nei Sistemi Informativi Geografici (GIS), attraverso cui, invece, il dato georeferenziato diventa informazione, potenzialmente in grado di rivelare nuovi pattern e di 'incrociare' dati di

## From CFD to GIS: a methodology to implement urban microclimate georeferenced databases

**Abstract.** The objective of this paper is to present a methodology for the integration of a Computational Fluid Dynamics (CFD) microclimate simulation and a Geographic Information System (GIS). The first workflow involves the attribution of spatial coordinates to the point data extracted from the CFD, the implementation of an SQLite database, and the connection to the database to visualise and use information on environmental and comfort variables. The second workflow involves georeferencing the CFD raster output, attributing an ID to the point data, creating a point grid in a GIS environment, and merging these with the point data on the microclimate. For demonstration purposes, the methodology is tested on a real case study using ENVI-met and ArcGIS Pro.

**Keywords:** Urban microclimate; CFD; ENVI-met; GIS; Software interoperability.

## Introduction

Research on urban climatology constitutes a well established field of studies in environmental design. Many elements simultaneously contribute to characterise climate at the local (with a resolution from 50 m to 100 km) and micro-urban (1 cm to 1 km) scales (Oke, 1987). Variations in wind direction and intensity, air temperature, relative humidity (Lobaccaro *et al.*, 2021) and, generally, in air quality contribute to inform the design of the city, with a view to mitigating the Urban Heat Island. The impact of built environment characteristics (related to urban density and form, building orientation and positioning, quality of surface materials and presence of ecosystem services) on the definition of user comfort and in response to a rapidly changing climate has been widely debated in the literature (Losasso *et al.*, 2021; Pollo *et al.*, 2020).

The rapid spread of enabling technologies, with the consequent increase in computing capabilities, redefines design practice in favour of computational approaches, which require interoperability, modelling, 'simulability' and connectivity (Tucci, 2020). In the context of open space design, Computational Fluid-Dynamic (CFD) numerical models, in particular, allow the simulation of the main environmental and comfort variables down to a resolution of less than 1 m, providing scientific support to professionals and decision-makers for the *ex-ante* and *ex-post* evaluation of urban transformation scenarios. On the other hand, managing simulations at this resolution scale requires a high degree of specialisation. Moreover, the data produced are rarely accessible and difficult to use outside the simulation environment as, for example, in Geographical Information

natura diversa per analisi spaziali multi-criteriali. L'obiettivo di questo articolo, dunque, è di implementare una metodologia per l'integrazione tra ambienti CFD e GIS, nella prospettiva di estrarre informazioni dai dataset microclimatici, output del processo di simulazione. Nel paragrafo seguente vengono presentati la metodologia, i software impiegati e il caso studio applicativo. Vengono successivamente introdotti due approcci per l'integrazione e la georeferenziazione dei dataset (*Workflow*), le cui potenzialità vengono discusse nel quinto paragrafo. Le conclusioni riportano le prospettive future legate all'ottimizzazione dei processi di interoperabilità, georeferenziazione e integrazione di informazioni in processi avanzati di analisi.

## Metodologia

Il processo di modellazione è stato condotto in ambiente ENVI-met 5.0.2, in grado di simulare, rispetto allo stato di fatto e a possibili scenari di trasformazione micro-urbana, i fenomeni alla scala dello *Urban Canopy Layer* (UCL), lo strato più basso dell'atmosfera urbana che si estende dal suolo all'altezza degli edifici (Erell *et al.*, 2012). La ricostruzione viene effettuata attraverso la valutazione delle interazioni che intercorrono tra variabili climatiche locali, vegetazione, superfici orizzontali e verticali (Bruse and Fleer, 1998). ENVI-met è in grado di simulare un ampio numero di variabili ambientali (radiazione solare, temperatura e umidità dell'aria e del suolo, temperature superficiali e concentrazione di inquinanti, etc.), così come i principali indici di comfort (*PET*, *PMV*, *UTCI* etc.). Tra le opzioni di output è possibile estrarre, per intervallo orario e variabile considerata, immagini raster in formato bitmap (\*.bmp), dataset

con valori puntuali riferiti ad ogni cella del modello, e file NetCDF (\*.nc). La georeferenziazione dei dati output ENVI-met è stata effettuata in ArcGIS Pro, utilizzato a scopo dimostrativo per evidenziare le possibilità offerte dall'interazione tra informazioni microclimatiche, ottenute da modello, e informazioni geografiche tradizionali, disponibili in numerosi formati e accessibili tramite GIS (Fig. 1).

Il principale limite all'integrazione dei dati microclimatici in ambiente GIS è rappresentato proprio dalla loro georeferenziazione, a causa del sistema di riferimento 'interno' utilizzato da ENVI-met. Per quanto riguarda il *Workflow* (A), il processo di georeferenziazione avviene tramite estrazione del dataset di dati puntuali in formato .xlsx (gestibile in Microsoft Excel) e l'attribuzione delle coordinate spaziali. I dati microclimatici sono successivamente stati organizzati in un database SQLite. La connessione al database durante la sessione di lavoro su ArcGIS Pro consente di lavorare agevolmente con altri dati spaziali. Nel caso studio, ad esempio, sono stati importati i dati vettoriali degli edifici dell'area d'interesse da OpenStreetMap (\*.osm). Per quanto riguarda il *Workflow* (B), l'approccio è basato invece su *shapefile* puntuali. Infatti, in seguito all'importazione dei dati vettoriali sull'edificato (\*.osm) e alla georeferenziazione del raster di simulazione (\*.bmp) (Fig. 2) in ArcGIS Pro, è stata creata una griglia avente numero di celle analogo rispetto alla griglia di modellazione in ENVI-met. È stato infine attribuito un ID ai dati puntuali sul microclima per consentire l'unione tra il dataset e i centroidi di ogni cella. A titolo esemplificativo, vengono riportate le elaborazioni relative alla Temperatura dell'aria (TA) alle ore 15:00 del 27/06/2019, con un range di valori simulati da 32.01°C a 33.43 °C.

Systems (GIS), through which georeferenced data actually become information, potentially able to reveal new patterns and to 'cross-reference' data of a different nature for multi-criteria spatial analyses. Therefore, the objective of this paper is to implement a methodology for the integration between CFD and GIS environments, to extract information from microclimate datasets, the output of the simulation process. The methodology, the software used and the case study are presented in the following section. Two approaches for the integration and georeferencing of datasets (*Workflows*) are then introduced, whose potential is discussed in the fifth section. The conclusions report on future perspectives related to the optimisation of interoperability processes, georeferencing and integration of microclimate information in advanced analysis processes.

## Materials and methods

The modelling process was conducted in the ENVI-met 5.0.2 environment, which is able to simulate climate-related phenomena occurring in the *Urban Canopy Layer* (UCL), the lowest layer of the urban atmosphere that extends from the ground to the height of the buildings (Erell *et al.*, 2012). Simulations may concern the actual state and possible micro-urban transformation scenarios, and are carried out by assessing the interactions between local climate variables, vegetation, and horizontal and vertical surfaces (Bruse and Fleer, 1998). ENVI-met can reconstruct a large number of environmental variables (e.g. solar radiation, air and soil temperature and humidity, surface temperatures and pollutant concentration, etc.), as well as the main comfort indices (e.g. *PET*, *PMV*, *UTCI*, etc.). Among the output options, it is

possible to extract, by time steps and variable considered, raster images in bitmap format (\*.bmp), datasets with point values referring to each model cell, and NetCDF files (\*.nc). Georeferencing of the ENVI-met output data was carried out in ArcGIS Pro, used for demonstration purposes to highlight the possibilities offered by the interaction between microclimatic information, obtained from the model, and traditional geographic information, available in numerous formats and accessible through GIS (Fig. 1). The main limitation to the integration of microclimate data in a GIS environment is their georeferencing, due to the 'internal' reference system used by ENVI-met. As for *Workflow* (A), the georeferencing process takes place through the extraction of the point data dataset in .xlsx format (manageable in Microsoft Excel) and the attribution of the spatial coordinates. The microclimate data were subsequently organised in an SQLite database. The connection to the database during the work session in ArcGIS Pro allows for easy work with other spatial data. In the case study, for example, vector data of buildings in the area of interest were imported from the OpenStreetMap database (\*.osm) too. Regarding *Workflow* (B), the approach is based on point shapefiles. In fact, following the import of the vector data on the built-up area (\*.osm) and georeferencing of the simulation raster (\*.bmp) (Fig. 2) in ArcGIS Pro, a grid with a similar number of cells as the modelling grid in ENVI-met was created. Finally, a unique ID was assigned to the point data on the microclimate to allow the dataset to be merged with the centroids of each cell. As an example, the results for Air Temperature (TA)

### Caso studio

L'area d'indagine si estende per  $\sim 1.8 \text{ km}^2$  (420m x 420m) e si colloca nel quadrante nord-est della Città di Torino, Italia (clima Cfa secondo la classificazione di Köppen-Geiger).

La peculiarità del tessuto urbano, orientato prevalentemente secondo l'asse nord-sud, non consente la definizione di un vero e proprio canyon urbano. Il 65% circa della superficie territoriale del lotto non è costruita; di questa, il 53% circa è destinata a verde orizzontale, con un rapporto tra numero di abitanti e quantità di superfici verdi superiore alla media della città ( $\sim 31 \text{ m}^2/\text{ab.}$  contro i  $\sim 24 \text{ m}^2/\text{ab.}$  circa) (Fig. 3).

### Workflow (A): implementazione del database

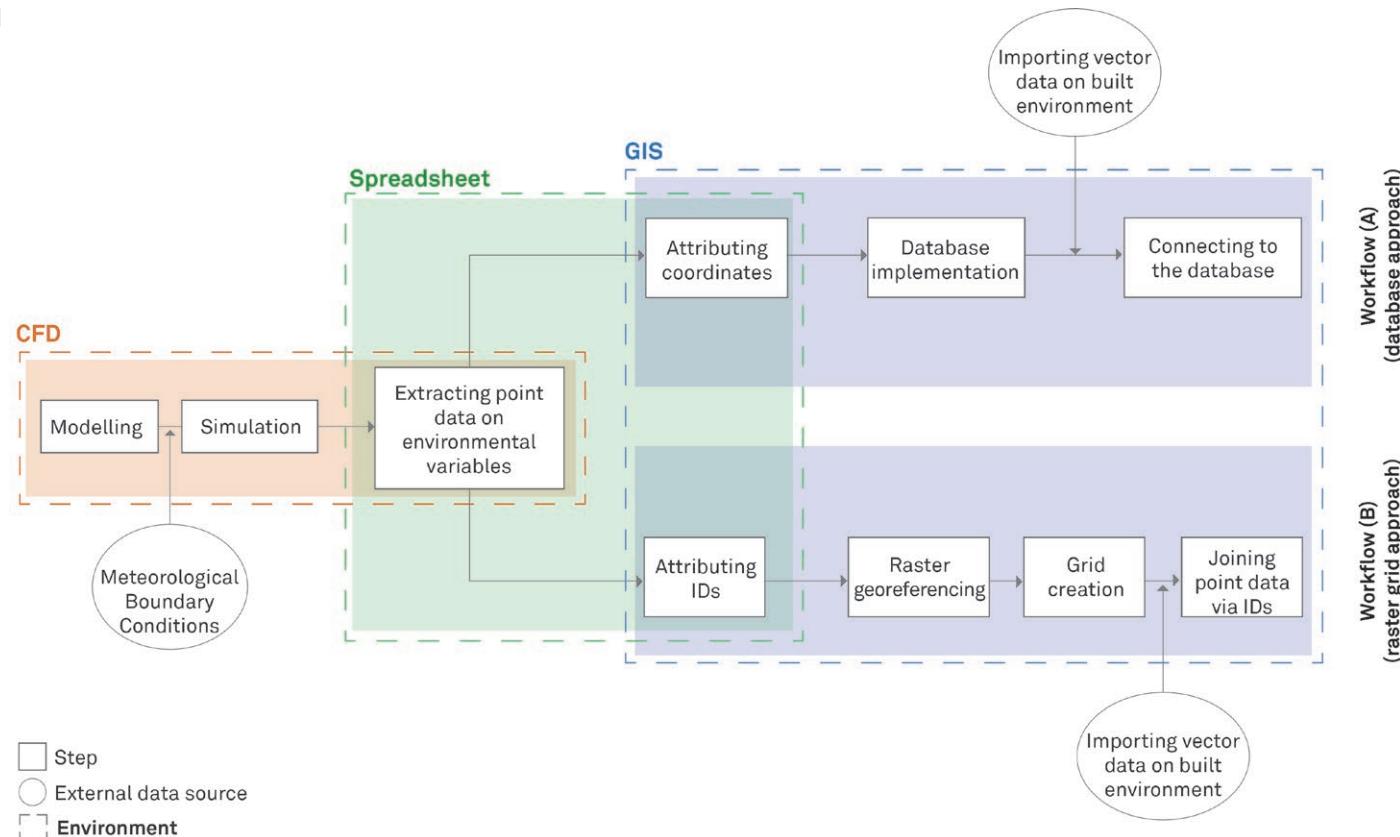
#### Modellazione e simulazione

La modellazione è stata effettuata mediante il modulo 'Space' di ENVI-met. La risoluzione spaziale è stata impostata come 2x2x2 (xyz), pertanto la griglia di digitalizzazione dell'area misura 210x210x30 m (in base alle dimensioni reali del lotto). Il raster a supporto della modellazione è stato scaricato dal Geoportale di Torino<sup>1</sup>, da cui sono state tratte anche le informazioni per la caratterizzazione dell'a-

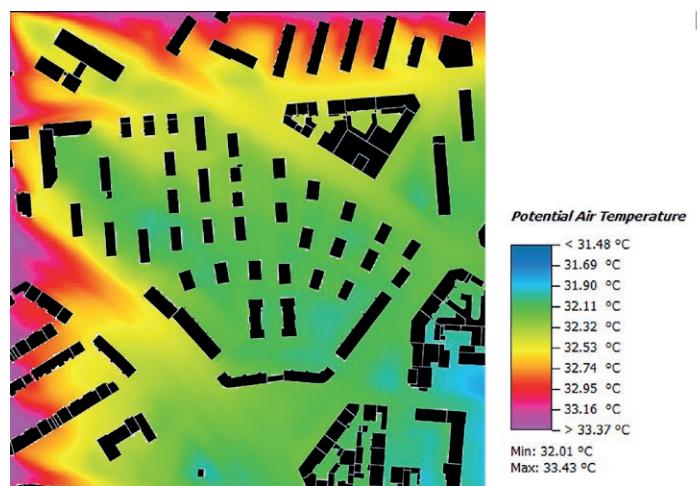
sfalto (condizione buona/sufficiente – albedo: 0.10; degradata – 0.15; molto degradata – 0.20) e degli alberi pubblici. Il settaggio del file simulazione, mediante i moduli 'ENVI-Core' ed 'ENVI-Guide', ha richiesto l'inserimento delle condizioni meteorologiche al contorno. I dati orari di temperatura dell'aria [ $^{\circ}\text{C}$ ], umidità relativa [%], radiazione solare [ $\text{W/m}^2$ ], velocità [m/s] e direzione [°] del vento sono stati scaricati tramite il portale di ARPA Piemonte<sup>2</sup>, selezionando la stazione urbana più vicina all'area analizzata ('Torino Grassi', a  $\sim 4$  km in linea d'aria dal caso studio), e sono relativi al giorno più caldo del 2019. Date le dimensioni del lotto e l'alta risoluzione spaziale, il processo di simulazione ha richiesto 148 h.

#### Gestione dei dati puntuali

I risultati sono stati estratti tramite il modulo 'Leonardo' in formato \*.bmp e \*.xlsx. I dati simulati puntuali sono stati gestiti attraverso un foglio di calcolo, all'interno del quale le coordinate spaziali dei punti (x,y) fanno fede alla griglia di modellazione nel sistema di riferimento interno del software (origine di coordinate 1,1). Considerata la risoluzione spaziale impostata (2x2), sono presenti 210 ascisse e 210 ordinate (44.100 punti). I



dati puntuali sono organizzati in maniera consequenziale per ordinate, per cui la prima 'serie' di dati riguarda tutte le ascisse di ordinata 1 (da 1,1 a 210,1). All'interno della tabella, sono state previste due colonne in riferimento alle coordinate spaziali del sistema WGS84, in Gradi Decimali, al fine di consentire la georeferenziazione di ogni punto. Attraverso l'utilizzo ArcGIS Pro, le coordinate del punto di origine del sistema di riferimento interno (1,1) sono state identificate (45.09070, 7.70930). Sul foglio di calcolo le ascisse dei punti relativi alla medesima ordinata sono state attribuite in modo incrementale, comando +2 per ogni ascissa, considerata la dimensione delle celle di modellazione (e.g., il punto (1,2) avrà coordinate (45.09070, 7.70932) e così via). Allo stesso modo, l'ordinata dei dati di coordinate interne (2,1) è stata individuata comando +2 all'ordinata di partenza (45.09072, 7.70930), proseguendo con l'attribuzione dei valori di longitudine. Infine, i dati 'nulli', riferiti alle celle con presenza di edificato, sono stati 'filtrati' ed eliminati, in



modo tale da gestire dati puntuali esclusivamente riferiti agli spazi aperti (35.500 dati puntuali).

#### Implementazione del database

Una volta attribuite le coordinate spaziali, i dati puntuali sono stati successivamente organizzati in un database SQLite Spatiale. Spatialite è una libreria *open source* che fornisce un'estensione spaziale del database SQLite, un *Database Management*



*System* (DBMS) relazionale che permette di concentrare in un unico file tutte le informazioni necessarie alla base dati. SQLite è stato scelto per la sua grande velocità e compattezza, che lo rendono ideale per lo *storage* di grandi quantità di dati. La sua ampia diffusione, inoltre, ne permette una buona interoperabilità con altri software, non solo di tipo GIS. A livello operativo, su ArcGIS Pro è stato creato un primo database SQLite ‘vuoto’ mediante l’apposita funzione ‘Catalog’, per poi importare il file \*.xsls con i dati puntuali. A questo punto, tramite la funzione ‘Display XY Data’, sono state fornite le coordinate spaziali.

#### Analisi e utilizzo dei dati

A titolo di test sono stati importati alcuni strati informativi da OpenStreetMap<sup>3</sup> per osservare l’integrazione dei dati spaziali con il database SQLite, contenente i dati microclimatici sulla TA. In particolare, si evidenzia come questo approccio permetta all’analista GIS di ricorrere ai dati simulati per le proprie analisi, più semplici da ottenere rispetto a misurazioni dirette. Il processo di georeferenziazione presenta comunque un certo grado di errore, dovuto a due ragioni. La prima è insita nella natura stessa del processo di modellazione su Envi-MET, che richiede la ‘digitalizzazione’ dell’area oggetto di analisi attraverso celle quadrate di una determinata dimensione, funzione della capacità di calcolo e dell’estensione reale dell’area. La seconda è dovuta al processo di georeferenziazione vero e proprio, applicato tramite ‘l’appoggio’ ad alcuni punti notevoli individuati nell’area. Il problema può essere in parte risolto con appositi strumenti messi a disposizione dal GIS. Trattandosi di dati puntuali, è infatti possibile distribuire i punti sulla base della loro densità pesata su un determinato parametro, individuan-

at 3:00 PM on 27/06/2019 is reported, with a simulated range of values from 32.01°C to 33.43°C.

#### Case study

The survey area covers ~1.8 km<sup>2</sup> (420 m x 420 m). It is located in northeast Turin, Italy (Cfa climate according to the Köppen-Geiger classification) (Fig. 3).

The peculiarity of the urban fabric, mainly oriented along the north-south axis, does not allow the definition of a true urban canyon. Approximately 65% of the plot’s land area is unbuilt; of this, approximately 53% is covered by horizontal greenery, with a ratio between the number of inhabitants over the quantity of green areas higher than the city’s average (~31 m<sup>2</sup>/inhab. vs. ~24 m<sup>2</sup>/inhab. approx.) (Fig. 3).

#### Workflow (A): database implementation

Modelling was carried out using the ‘Space’ module of ENVI-met. The spatial resolution was set as 2x2x2 (xyz); therefore, the digitisation grid of the area measures 210x210x30 m (based on the actual dimensions of the plot). The raster supporting the modelling was downloaded from the Geoportal of Turin<sup>1</sup>, from which information on the asphalt maintenance (good/sufficient condition - albedo: 0.10; degraded - 0.15; very degraded - 0.20) and the public trees was extracted. The setting of the simulation file, using the modules ‘ENVI-Core’ and ‘ENVI-Guide’, required the input of the meteorological boundary conditions. The hourly data of air temperature [°C], relative humidity [%], solar radiation [W/m<sup>2</sup>], wind speed [m/s] and direction [°] were downloaded from the ARPA

do le aree più o meno soggette a un determinato fenomeno. La figura 5 rappresenta il parametro TA come *Heatmap* dinamica, sovrapposto ai dati vettoriali degli edifici e della rete stradale.

#### Workflow (B): georeferenziazione del raster

Dopo aver completato il processo di modellazione e simulazione e importato i dati vettoriali dell’area (\*.osm), si procede con la georeferenziazione dell’output raster di ENVI-met. L’operazione viene eseguita mediante la funzione ‘Add Control Points’, garantendo la georeferenziazione di (almeno) quattro punti notevoli. Sarà quindi sufficiente applicare una griglia di lavoro al raster, attraverso la funzione ‘Fishnet’, avente numero di ‘righe’ e ‘colonne’ pari al numero di celle utilizzate in ambiente ENVI-met (in questo caso, 210x210). L’output del processo sarà dunque una nuova *Feature Class*<sup>4</sup>, contenente dei poligoni e il loro centroide, con un proprio ID (da 1 a 44.100). Al fine di collegare in maniera univoca i valori puntuali di temperatura dell’aria alle ‘celle’ create, sarà poi necessario attribuire, procedendo per ‘righe’, un ID analogo ai dati puntuali nel foglio di calcolo, che questa volta non richiederanno dunque l’assegnazione delle coordinate spaziali. La sorgente dati potrà infine essere ‘agganciata’ alla *Feature Class* attraverso la funzione ‘Joins’ (Fig. 6).

#### Discussioni

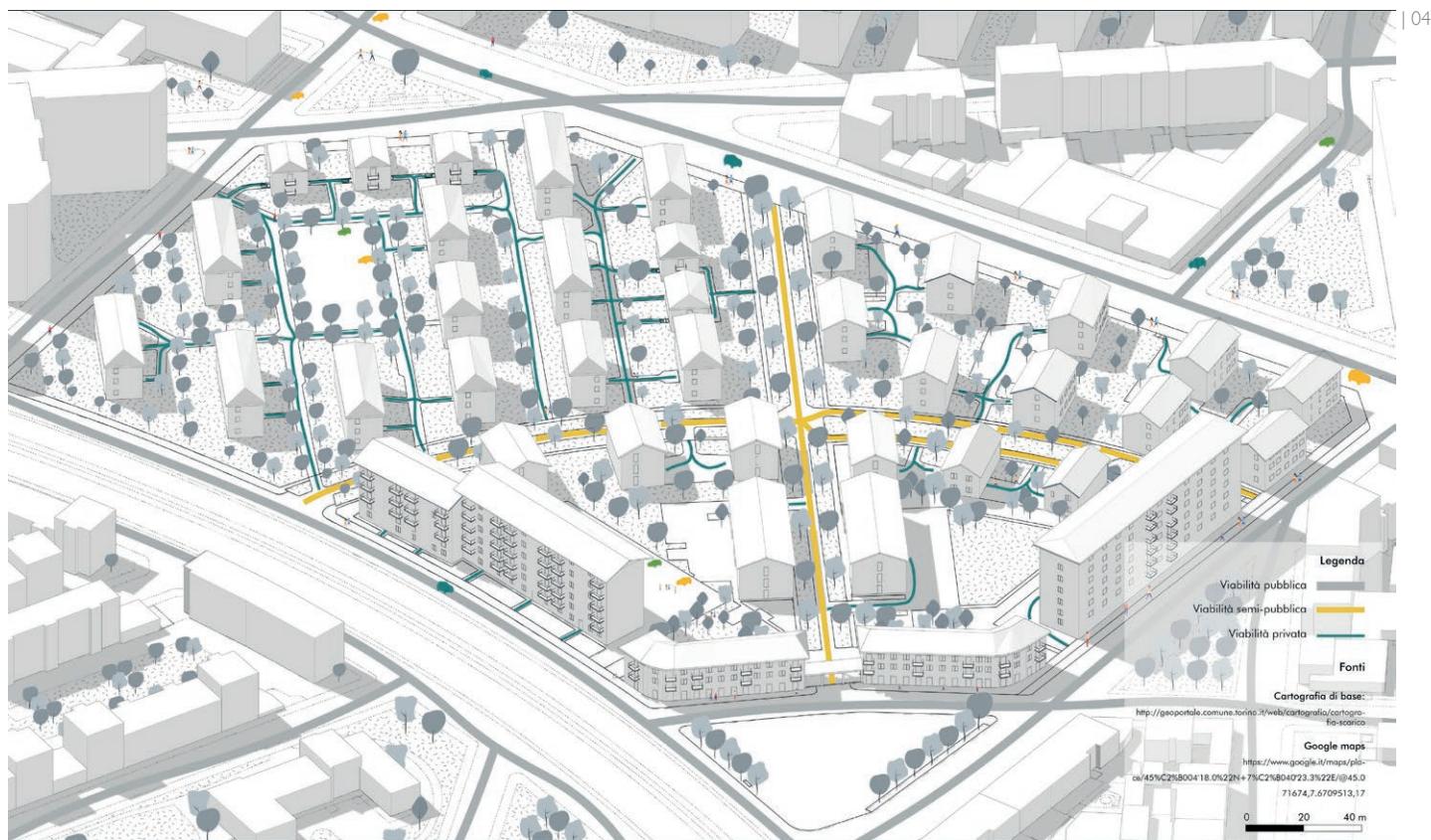
Per quanto riguarda lo sviluppo del software ENVI-met, esistono già diverse opzioni che consentono di integrare dati vettoriali \*.osm e *shapefile* ‘in ingresso’, per agevolare le fasi di modellazione. Segnaliamo, peraltro, la possibilità di utilizzare

Piemonte<sup>2</sup> portal, selecting the closest urban station to the analysed area (‘Torino Grassi’, ~4 km as the crow flies from the case study), and are relative to the hottest day of 2019. Given the size of the plot and the high spatial resolution, the simulation process took 148 h.

#### Managing point data

The results were extracted via the ‘Leonardo’ module in \*.bmp and \*.xlsx formats. The simulated point data were managed via a spreadsheet, in which the spatial coordinates of the points (x,y) are based on the modelling grid in the software’s internal reference system (coordinate origin 1,1). The point data are organised consequently by ordinates, whereby the first ‘series’ of data concerns all abscissae of ordinate 1 (from 1,1 to 210,1). Given the spatial resolution set (2x2), there are 210 abscissae and 210 ordinates in total (44,100 points).

Within the table, two columns were provided in reference to the spatial coordinates of the WGS84 system, in Decimal Degrees, in order to allow georeferencing of each point. Using ArcGIS Pro, the coordinates of the origin point of the internal reference system (1,1) were identified (45.09070, 7.70930). On the spreadsheet, the abscissae of the points relative to the same ordinate were assigned incrementally, adding +2 for each abscissa, given the size of the modelling cells (e.g. point (1,2) will have coordinates (45.09070,7.70932) and so on). Similarly, the ordinate of the internal coordinate (2,1) was identified by adding +2 to the starting ordinate (45.09072, 7.70930), keeping on assigning the longitude values. Finally, the ‘null’ data, referring to cells with the presence of built-up areas, were ‘filtered’ and eliminated, in order to handle



'in uscita' l'estensione NetCDF<sup>5</sup> per la georeferenziazione diretta degli output climatici. Tuttavia, notevoli difficoltà sono state incontrate dagli autori nell'importazione dei file relativi alla TA (\*.nc) in ArcGIS Pro. Un singolo file orario ha richiesto circa 50' per poter essere importato ed è stato impossibile gestire il file

climatico complessivo relativo all'intera simulazione (dalle dimensioni superiori ai 5GB). Non è stato inoltre possibile importare alcun file \*.nc in QGIS<sup>6</sup>.

L'importazione dei dati su ArcGIS Pro ha invece consentito di ricostruire il *trend* della TA del tutto assimilabile alla visualiz-

point data exclusively referring to open spaces (35,500 points).

#### Database implementation

Once the spatial coordinates were assigned, the point data were subsequently organised in an SQLite Spatialite database. Spatialite is an open-source library that provides a spatial extension of the SQLite database, a relational Database Management System (DBMS) that allows all necessary database information to be concentrated in a single file. SQLite was chosen for its great speed and compactness, making it ideal for storing large amounts of data. Its widespread use also allows for good interoperability with other software than GIS. At an operational level, an initial 'empty' SQLite database was created on ArcGIS Pro using the 'Catalog' function, and then the \*.xsls file with the point data was imported.

At this point, spatial coordinates were provided via the 'Display XY Data' function.

#### Data analysis and utilisation

As a test, some information layers were imported from OpenStreetMap<sup>3</sup> to observe the integration of spatial data with the SQLite database containing microclimatic data on the TA. Specifically, this approach allows the GIS analyst to use simulated data for analysis, which is easier to obtain than direct measurements. However, the georeferencing process has a certain degree of error for two main reasons. The first is intrinsic to the modelling process on Envi-MET, which requires the 'digitisation' of the area using square cells of a certain size, which is a function of the calculation capacity and the real extent of the plot. The second is due to the actual georeferencing process,

applied by 'picking' several notable points identified in the area. This problem can be partially solved with special tools provided by the GIS. Since we are dealing with point data, it is possible to distribute the points based on their density weighted on a given parameter, identifying the areas that are more or less subject to a certain phenomenon. Fig. 5 shows the TA parameter as a dynamic heatmap, superimposed on the vector data of the buildings and the road network.

#### Workflow (B): raster georeferencing

After completing the modelling and simulation process, and importing the vector data on buildings and roads (\*.osm), we proceed with georeferencing of the bitmap, the ENVI-met's raster output. The operation is performed using the 'Add Control Points' function, georeferencing (at least) four

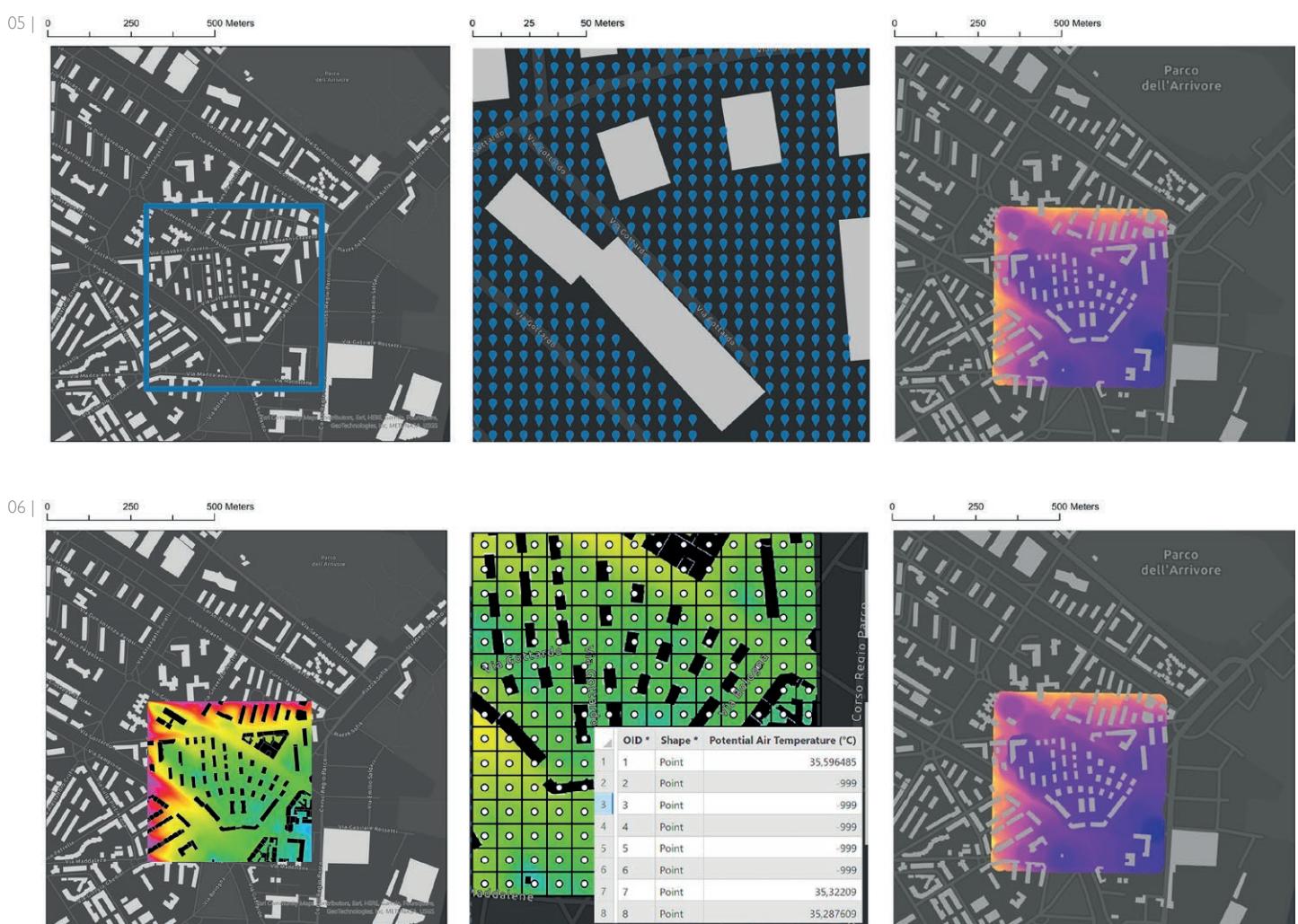
notable points. It will then be sufficient to apply a working grid to the raster, through the 'Fishnet' function, having 'rows' and 'columns' equal to the number of cells used in the ENVI-met environment (in this case, 210x210). The output of the process will, therefore, be a new Feature Class<sup>4</sup>, containing polygons and their centroids, with its ID (from 1 to 44,100). To unambiguously link the point values of air temperature to the 'cells' created, it will, therefore, be necessary to assign, proceeding by 'rows', a similar ID to the point data in the spreadsheet, which this time will not require the assignment of single spatial coordinates. The data source can finally be joined to the Feature Class via the 'Joins' function (Fig. 6).

#### Discussions

Concerning the development of the ENVI-met software, there are already

05 | Importazione in ArcGIS Pro dei dati vettoriali da OpenStreetMap (sinistra); zoom sui dati puntuali georeferenziati mediante collegamento al database (centro); visualizzazione dei dati come Heatmap dinamica (destra)  
 Importing vectorial data from OpenStreetMap (left); zoom on georeferenced point data by linking to the database (center); visualization of data as a dynamic heatmap (right)

06 | Georeferenziazione del raster in ArcGIS Pro (sinistra); applicazione della funzione 'Fishnet' (centro) e attribuzione dei valori di TA mediante ID; visualizzazione dei dati (destra). Si segnala che, a scopo illustrativo e per questioni di visibilità, l'immagine riporta una griglia fittizia di dimensioni 20x20 celle  
 Georeferencing the raster in ArcGIS Pro (left); applying the 'Fishnet' function (center) and assigning TA values via ID; displaying the data (right). It should be noted that, as an example and for visibility issues, the image shows a fictitious grid of size 20x20 cells



several options that allow the integration of vector data \*.osm and *shapefiles* 'in input', to facilitate the modelling phases. We also point out the possibility of using the NetCDF5 (\*.nc) extension 'on the output' for direct georeferencing of climate simulations. However, considerable difficulties were encountered by the authors in importing the (\*.nc) TA files into ArcGIS Pro. A single-time file took about 50' to be imported, and it was impossible to handle the overall climate file for the entire simulation (over 5 GB in size). It was also not possible to import any \*.nc files into QGIS6.

Importing the data into ArcGIS Pro, on the other hand, made it possible to reconstruct a TA trend, which is definitely similar to the raster view (Figs.

2, 5, 6). As regards the limitations of the proposed approach, data from one of the ARPA meteorological stations in the study area were used for the simulation, as mentioned. This is undoubtedly useful to carry out the analysis; however, it refers to a dataset acquired in a single meteorological station, which is just 'close' to the area of interest. In this regard, a climate reanalysis dataset with a spatial resolution of 2.2x2.2 km (VHR-REA\_IT Dataset) was made available during the final drafting phase of the article (Raffa *et al.*, 2021). Therefore, integration in this sense will be taken into account for further developments. In addition, a large amount of point data were extracted, but they were just related to TA simulation at 3:00 PM. This leads

us to suggest that, for larger-scale applications, the resolution of the modelling grid could be reduced.

As far as Workflow (A) is concerned, the choice of using a connection to a database would make it possible to overcome the main limitations of *shapefiles* (\*.shx, \*.shp, \*.dbf etc.), linked to the difficulty of transferring and managing multi-file folders with different formats, metadata and reference systems. Among the critical points encountered was the need to proceed 'autonomously' with the georeferencing of point data, which, in the case of simulations over larger areas, can represent a strong limitation to the implementation of the methodology. As for Workflow (B), the process described is more agile, but the men-

tioned limitations of working locally using *shapefiles* (the centroid points created by the 'Fishnet' function) still remain. The two approaches could be adopted depending on the needs, the scale of the survey and the type of users who will use the information produced. However, we would like to point out that Spatialite database was chosen because it can condense all the data into a single file, but it is not the only type of database that can be used (see Oracle, GeoPackage or PostgreSQL). However, the use of a database, whose main strength lies in the possibility of uploading to a server available to other users, might be preferable in the presence of large quantities of information and a heterogeneous typology of users needing to access it.

zazione in formato *raster* (Figg. 2, 5, 6). Per quanto riguarda i limiti dell'approccio proposto, come accennato, per la simulazione sono stati utilizzati i dati di una stazione meteorologica prossima all'area di studio. Questo è senza dubbio un dato utile allo svolgimento delle analisi, tuttavia fa riferimento ad un dataset acquisito in un 'punto' nello spazio, a circa 4 km dall'area di interesse. A tal proposito, durante la fase finale di stesura dell'articolo, è stato reso disponibile un dataset di rianalisi climatiche con una risoluzione spaziale pari a 2,2x2,2 km (VHR-REA\_IT Dataset) (Raffa *et al.*, 2021). Pertanto, nella prospettiva di future implementazioni, si terrà conto di una possibile integrazione in tal senso. Inoltre, data la grande quantità di dati puntuali estratti, relativi alla simulazione delle ore 15:00 e alla sola variabile microclimatica legata alla TA, suggeriamo che, per applicazioni a scala più ampia, la risoluzione spaziale della griglia di modellazione potrebbe essere inferiore.

Per quanto riguarda il *Workflow* (A), la scelta di operare mediante collegamento ad un *database* consentirebbe di superare le principali limitazioni proprie degli *shapefile* (\*.shx, \*.shp, \*.dbf etc.), legate alla difficoltà di trasferimento e gestione di cartelle *multifile* con formato diverso, dei metadati e dei sistemi di riferimento. Tra le criticità riscontrate nell'implementazione del processo, segnaliamo la necessità di dover 'autonomamente' georeferenziare i dati puntuali che, nel caso di simulazioni su aree più estese, può costituire un limite notevole all'implementazione della metodologia. Segnaliamo inoltre che Spatialite è stato scelto in quanto in grado di condensare tutti i dati in un unico file, ma non è l'unico tipo di database a cui si può fare ricorso (cfr. Oracle, GeoPackage o PostgreSQL). Per quanto riguarda il *Workflow* (B), il processo descritto è più

snello, ma rimangono i limiti, già citati, di lavorare in locale mediante *shapefile* (i punti centroidi creati dalla funzione 'Fishnet'). I due approcci potrebbero essere adottati a seconda delle necessità, della scala di indagine e del tipo di utenti che usufruiranno delle informazioni prodotte. L'utilizzo di un database, il cui principale punto di forza risiede nella possibilità di caricamento su un server a disposizione di altri utenti, potrebbe tuttavia essere preferibile in presenza di grandi quantità di informazioni e di una tipologia eterogenea di utenti che hanno la necessità di accedervi.

### Conclusioni e prospettive future

Nell'ambito degli studi del microclima, l'utilizzo dei dati derivanti dalle tecniche di *Remote Sensing* (RS), sebbene largamente accessibili e georeferenziati, implicano alcune limitazioni. Questi, infatti, forniscono informazioni, ad una risoluzione spaziale solitamente inferiore rispetto alle simulazioni CFD a scala micro-urbana, che sono perlopiù relative alle temperature dell'aria e delle superfici. Infine, i dati derivanti da RS non consentono di apprezzare l'evoluzione giornaliera delle variabili legate al microclima urbano, in quanto strettamente dipendenti dalla copertura satellitare di una determinata area, né di calcolare gli indici di comfort, centrali nella corretta progettazione degli spazi aperti, spesso veri e propri 'strumenti' di verifica della qualità del progetto ambientale. D'altro canto, i software di tipo CFD sono tra i più avanzati ed utilizzati nell'ambito degli studi sulla climatologia alla scala dello UCL e di verifica progettuale da parte di architetti e tecnici. Il ruolo abilitante delle tecnologie digitali di modellazione e simulazione, nell'ambito della climatologia micro-urbana

**Conclusions and future perspectives**  
In the context of microclimate research, the use of data derived from Remote Sensing (RS) techniques, although widely accessible and georeferenced, implies certain limitations. RS data provide information, which usually comes with lower resolution compared to CFD simulations at the micro-urban scale. Moreover, this information mainly regards air and surface temperatures. Eventually, RS data might not allow to investigate the daily evolution of urban microclimate environmental variables, as they are strictly linked to the satellite coverage of a certain area. Besides, they do not allow to derive comfort indexes, which are essential to properly design open spaces, as they turn out to be actual 'tools' to check the quality of the environmental design. On the other hand, CFD software is among the most advanced

and widely adopted approaches in climatology studies at the UCL scale, as well as in a project's quality assessment by architects and other professionals. Therefore, the enabling role of digital technologies for modelling and simulation, in the field of micro-urban climatology, is crucial when it comes to *ex-ante* assessment of several design options, affecting user comfort, the UHI mitigation and, thus, the climate adaptation scenarios. Consolidating the evidence-based approach of the technological environmental design at urban and micro-urban scale, user-centred to promote the well-being and quality of spaces, needs updated datasets that are accessible to stakeholders. Thanks to advanced simulations and georeferencing, these datasets are essential to provide advanced knowledge on the main environmental variables, con-

sidering several (hour and season) climatic conditions, on comfort indexes, and considering rising temperatures. Indeed, among the most promising future developments we can mention the possibility of carrying out micro-climatic analysis considering not only the observed climatic conditions, but also future projections based on the IPCC's Shared Socioeconomic Pathways (2022), to consolidate the role of the project as a means of coping with forthcoming environmental crises (Gherri *et al.*, 2021). Furthermore, the use of georeferenced information at such a high space-time resolution would allow for the differentiation of different thermal comfort conditions as 'boundary conditions' change, to support epidemiological studies (e.g. heat-health nexus) (Ellena *et al.*, 2020), targeted project analyses (Zhou and Dai, 2021) and context-specific assess-

ments (e.g. neighbourhood climate action) (Johnson *et al.*, 2021).

Finally, we point out that it might be appropriate to create (a set of) *plug-ins* to facilitate the software interoperability between simulation and georeferencing/analysis environments at the 'output' stage too. This would help to expand the designers' 'toolkit', allowing architects, urban planners and engineers to rely on the integration of geographical and modelling data for design at multiple scales. From this point of view, an important step forward could be the automation of the generation of CFD outputs and the attribution of spatial coordinates to simulated data. This data may be stored in the form of accessible databases (e.g. organised per environmental/comfort variable, season, day, hour, climate change scenario, etc.), to be updated and overwritten with subsequent sim-

na, rimane pertanto centrale in relazione alla verifica *ex-ante* delle alternative progettuali, rispetto al loro impatto sul comfort per l'utente, sulla mitigazione dell'Isola di Calore Urbana e, dunque, sugli scenari di adattamento climatico.

Il consolidamento dell'approccio *evidence-based* del progetto tecnologico ambientale alla scala urbana e micro-urbana, incentrato sulla promozione del benessere e della qualità degli spazi, necessita pertanto di *dataset* aggiornati e accessibili agli *stakeholder*, in grado di fornire, attraverso la georeferenziazione, conoscenza avanzata rispetto alle principali variabili ambientali considerando diverse condizioni climatiche (orarie e stagionali), agli indici di comfort, e ai trend relativi alle temperature in costante aumento. Tra gli sviluppi futuri più promettenti, infatti, segnaliamo la possibilità di effettuare analisi microclimatiche considerando anche le proiezioni future basate sugli *Shared Socioeconomic Pathways* dell'IPCC (2022), al fine di consolidare il ruolo del progetto come mezzo per fronteggiare le prossime crisi ambientali (Gherri *et al.*, 2021). Inoltre, l'utilizzo di informazioni georeferenziate e con una così alta risoluzione spazio-temporale permetterebbe di supportare studi epidemiologici (e.g., *heat-health nexus*) (Ellena *et al.*, 2020), analisi progettuali mirate (Zhou and Dai, 2021) e valutazioni specifiche di contesto (e.g., *neighbourhood climate action*) (Johnson *et al.*, 2021). Segnaliamo infine che, con l'obiettivo di favorire l'interfaccia tra CFD e GIS, potrebbe risultare opportuno predisporre un (set di) *plug-in* per facilitare l'interoperabilità tra gli ambienti di simulazione e di georeferenziazione/analisi anche 'in uscita'. Questo contribuirebbe infatti ad ampliare il 'toolkit' del progettista, che potrebbe contare sull'integrazione di dati geografici e modellistici per la progettazione su più scale. Da questo punto

ulations, making the interaction with the GIS much more agile and opening up interesting scenarios in visualising 'online almost real-time' data.

#### NOTES

<sup>1</sup> Geoportale di Torino: <http://geoportale.comune.torino.it/web/>

<sup>2</sup> ARPA Piemonte: <http://www.arpa.piemonte.it/dati-ambientali/dati-meteo-idiografici-giornalieri-richiesta-automatica>

<sup>3</sup> OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/export#map=5/51.500/-0.100>

<sup>4</sup> A *Feature Class* is a homogeneous category of elements with the same spatial representation (points, lines or polygons) and a set of attribute columns in common

<sup>5</sup> The *Network Common Data Format* (NetCDF) is a set of software libraries and *machine-independent* data formats

that support the creation, access and sharing of scientific data, mainly used in the field of climate data

<sup>6</sup> The same problem was faced by several users of the 'ENVI-met support centre' forum: <http://www.envi-hq.com/>

#### ACKNOWLEDGMENTS

Conceptualisation: M.T. (Matteo Trane), G.R. (Guglielmo Ricciardi), M.S. (Mattia Scalas); coordination: M.T.; modelling and simulation: M.T.; data management: M.T., G.R., M.S., M.E. (Marta Ellena); first draft: M.T., M.S.; revision: M.E., G.R. All authors have read and approved the published version of the manuscript.

This paper is part of the work developed by the Unit Politecnico di Torino – Associated Investigator Prof. R. Pollo, Research Assistant M. Trane - within the National Research Project

di vista, un passo avanti importante potrebbe essere rappresentato dall'automatizzazione della generazione degli output CFD e dell'attribuzione di coordinate spaziali ai dati simulati. La costruzione di database (organizzati, ad esempio, per variabile ambientale/di comfort, stagione, giorno, ora, etc.), aggiornabili e sovrascrivibili con successive simulazioni, renderebbe l'integrazione con il GIS molto più agile, aprendo a interessanti scenari nella visualizzazione dei dati 'online almost real-time'.

#### ATTRIBUZIONE

Concettualizzazione: M.T. (Matteo Trane), G.R. (Guglielmo Ricciardi), M.S. (Mattia Scalas); coordinamento: M.T.; modellazione e simulazione: M.T.; gestione dei dati: M.T., G.R., M.S., M.E. (Marta Ellena); prima stesura: M.T., M.S.; revisione: M.E., G.R. Tutti gli autori hanno letto e approvato la versione pubblicata del manoscritto.

Questo *paper* è parte del lavoro sviluppato dall'Unità del Politecnico di Torino – A.I. Prof. R. Pollo, Assegnista di Ricerca M. Trane – nell'ambito del PRIN 'TECH-START' (*key enabling TECHnologies and Smart environment in the Age of gReen economy, convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation*) – P.I. Prof. M. Losasso.

#### NOTE

<sup>1</sup> Geoportale di Torino: <http://geoportale.comune.torino.it/web/>.

<sup>2</sup> ARPA Piemonte: <http://www.arpa.piemonte.it/dati-ambientali/dati-meteo-idiografici-giornalieri-richiesta-automatica>.

<sup>3</sup> OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/export#map=5/51.500/-0.100>.

<sup>4</sup> Una *Feature Class* è una categoria omogenea di elementi con la stessa rappresentazione spaziale (punti, linee o poligoni) e un insieme di colonne di attributi in comune.

PRIN 'TECH-START' (*key enabling TECHnologies and Smart environment in the age of gReen economy, convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation*) – Principal Investigator Prof. M. Losasso.

<sup>5</sup> Il *Network Common Data Format* (NetCDF) è un set di librerie software e formati dati *machine-independent* che supporta la creazione, l'accesso e la condivisione di dati scientifici, prevalentemente utilizzato nel campo dei dati climatici.

<sup>6</sup> Problema riscontrato da molti del forum 'ENVI-met support center': <http://www.envi-hq.com/>.

## REFERENCE

- Losasso, M., Lucarelli, M.T., Rigillo, M. and Valente, R. (Eds.) (2021), *Adapting to the changing climate. Knowledge innovation for the Environmental Design*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, Italy.
- Oke, T.R. (1987), *Boundary Layer Climates*, Routledge, London.
- Erell, E., Pearlmutter, D. and Williamson, T. (2012), *Urban Heat Island. Designing the space between buildings*, Routledge, London.
- Tucci, F. (2020), "Requirements, approaches, visions in the prospects for development of technological design", in Lauria, M., Mussinelli, E., and Tucci, F. (Eds.), *Producing Project*, Maggioli Editore, Sant'Arcangelo di Romagna, Italy, pp. 33-42.
- Bruse, M. and Fleer, H. (1998), "Simulating Surface-Plant-Air Interactions inside Urban Environments with a Three-Dimensional Numerical Model", *Environmental Modeling & Software*, Vol. 13, pp. 373-84.
- Ellena, M., Breil, M. and Soriani, S. (2020), "The heat-health nexus in the urban context: A systematic literature review exploring the socio-economic vulnerabilities and built environment characteristics", *Urban Climate*, Vol. 34, 100676. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100676> (Accessed on 3/07/2022).
- Gherri, B., Maiullari, D., Finizza, C., Maretto, M., and Naboni, E. (2021), "On the Thermal Resilience of Venetian Open Spaces", *Heritage*, Vol. 4, n.4, pp. 4286-4303. Available at: <https://www.mdpi.com/2571-9408/4/4/236> (Accessed on 13/05/2022).
- Johnson, S., Haney, J., Cairone, L., Huskey, C. and Kheirbek, I. (2020), "Assessing air quality and public health benefits of New York City's climate action plans", *Environmental science & technology*, Vol. 54, n. 16, pp. 9804-9813. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00694> (Accessed on 18/06/2022).
- Lobaccaro, G., De Ridder, K., Aceri, J.A., Hooyberghs, H., Lauwaet, D., Maiheu, B., Sharma, R. and Govehovitch, B. (2021), "Applications of Models and Tools for Mesoscale and Microscale Thermal Analysis in Mid-Latitude Climate Regions - A Review", *Sustainability*, Vol. 13, 12385. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/22/12385> (Accessed on 05/07/2022).
- Pollo, R., Biolchini, E., Squillaciotti, G. and Bono, R. (2020), "Designing the Healthy City: an interdisciplinary approach", *SMC*, Vol. 11, pp. 54-58. Available at: <http://www.sustainablemediterraneanconstruction.eu/SMC/Home.html> (Accessed on 06/07/2022).
- Raffa, M., Reder, A., Marras, G. F., Mancini, M., Scipione, G., Santini, M. and Mercogliano, P. (2021), "VHR-REA\_IT Dataset: Very High-Resolution Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis over Italy by COSMO-CLM", *Data*, Vol. 6, n. 8, 88. Available at: <https://doi.org/10.3390/data6080088> (Accessed on 09/07/2022).
- Zhou, H. and Dai, Z. (2021), "Green urban garden landscape simulation platform based on high-resolution image recognition technology and GIS", *Microprocessors and Microsystems*, vol. 82, 103893. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.103893> (Accessed on 14/08/2022).

Giacomo Chiesa, <https://orcid.org/0000-0003-3783-5143>

Francesca Fasano,

Paolo Grasso,

Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Italia

giacomo.chiesa@polito.it

francesca.fasano@polito.it

paolo.grasso@polito.it

**Abstract.** Il paper descrive alcuni scenari d'uso di un'innovativa piattaforma (utente-monitoraggio-simulazioni) per la simulazione energetica degli edifici e il calcolo di indicatori di performance per coadiuvare, in un'ottica interoperabile e aperta, le scelte progettuali e operative sfruttando la capacità abilitante delle ICT in ambito architettonico. La modularità della soluzione permette lo sviluppo di applicazioni precostituite a supporto dei professionisti: impatto delle variazioni nelle scelte tecnologico-progettuali, calibrazione di modelli, performance-gap tra edificio simulato-monitorato. Il paper affronta alcune nuove potenzialità architettoniche del tool in ottica capacitante, focalizzandosi sulle componenti sviluppate e testate nell'ambito del progetto EU H2020 EDYCE.

**Parole chiave:** Tecnologie abilitanti; Progetto e ICT; Efficienza energetica; Dimensione interattiva; Piattaforme multidisciplinari.

## Introduzione

Il ruolo abilitante delle Tecnologie di Informazione e Comunicazione (ICT) per la gestione e il progetto degli edifici è tuttora un complesso ambito di ricerca che affronta numerose sfide. Da un lato il rischio di estinzione della figura dell'architetto tradizionale (Celanto, 2007) sostituendo la dimensione bio-culturale del progetto (Girardet, 2008) con approcci tecnocratici, perdendo la necessaria dimensione culturale e sentimentale degli spazi abitativi (Ghirri, 2021), e producendo spazi serializzati (Sennett, 2008) che si deprezzano come automobili (Droege, 2006). Dall'altro lato il rischio di ridurre le innovazioni digitali a semplici sostitute di strumenti tradizionali. Come evidenziato da Oxman (Oxman, 2006), l'applicazione di strategie di progetto digitali è iniziata con una semplice sostituzione delle operazioni manuali tramite strumenti digitali, seguita da una crescita di consapevolezza delle potenzialità offerte, superando l'uso dei CAD come tecnografi. L'approccio esigenziale-prestazionale

proprio della tecnologia dell'architettura può trovare facile applicazione nei nuovi strumenti digitali, supportando analisi e ottimizzazioni delle soluzioni progettuali e operative (Chiesa, 2020). Tale approccio prestazionale, standardizzato nel metodo esigenziale-prestazionale – si veda (Cavaglià *et al.*, 1975) e gli standard UNI –, trova connessioni con l'informatica già nella metà del XX secolo nell'opera di Giuseppe Ciribini (Bosia, 2013), includendo sistemi esperti (Ciribini, 1968) e l'approccio cibernetico di Wiener (Wiener, 1988). La visione prestazionale del progetto, tuttavia, affronta oggi una nuova era, come sottolineato da numerose ricerche – (de Wilde, 2018) e (Esposito and Bosi, 2021). Nuove potenzialità emergono dalla progressiva adozione di metodologie di programmazione atte a permettere analisi in tempo reale e combinare fonti di dati multiple e produzioni massive degli stessi tramite tecnologie IoT, monitoraggi cloud, approcci massivi alle simulazioni (Chiesa *et al.*, 2019; Besuievsky *et al.*, 2021). Tale nuova dimensione richiede un approccio multi-disciplinare per supportare l'azione progettuale con nuovi strumenti le cui potenzialità processuali non sostituiscano il ruolo primario del progettista. Tali strumenti sono attualmente gestiti da piattaforme interoperabili, capaci di gestire fonti di dati disomogenee e diversi linguaggi di programmazione, supportando co-simulazioni e predizioni secondo una visione di co-progettazione e co-gestione degli edifici (Shahinmoghadam *et al.*, 2021). Focalizzandosi sui comportamenti energetici degli edifici, per quanto siano disponibili numerosi *software* di simulazione energetico-dinamica che permettono di quantificare gli impatti energetici e di comfort dovuti alle diverse scelte di progetto, il

## Energy simulation platform supporting building design and management

**Abstract.** The paper describes specific usage scenarios of an innovative platform, interfacing users, monitoring, and simulations for building energy simulations and the computation of key performance indicators to support, in an interoperable and open vision, design and management choices exploiting the enabling capabilities of ICT in architecture. The modularity of the proposed solution allows the development of pre-defined usage scenarios for professionals: impact of modifications in technological design choices, model calibration, and performance gap between simulated and monitored building data. The paper faces some new architectural usage scenarios of the tool, considering its enabling capabilities, and focuses on the tool's components developed and tested in the EU H2020 E-DYCE project. **Keywords:** enabling technologies; design and ICT; building energy efficiency; interactive dimension; multidisciplinary platforms.

## Introduction

The enabling role of Information and Communication Technologies (ICT) in building management and design is still a complex research field with numerous open challenges. On the one hand, the risk of extinction of typical architectural figures (Celanto, 2007) by replacing the bio-cultural dimension of building design and management (Girardet, 2008) with technocratic-driven approaches, thus losing the needed correlation with the cultural and sentimental aspects of the living space (Ghirri, 2021), producing un-liveable CAD-mass-produced spaces (Sennett, 2008) that deprecate like cars (Droege, 2006). On the other hand, the risk of reducing digital-driven innovations to simple substitutes for traditional instruments. As highlighted by Oxman (Oxman 2006), the application of digital design strategies started with a simple substitution of manual operations with digital devices, and was followed by a growing consciousness of the potential offered by computer-aided tools, underscoring the simple possibility of using CADs as drafting machines. The architectural technology performance-driven approach may be adapted to support the informed use of innovative tools to underpin advanced functionalities and support design and operation analyses, and to optimise various solutions (Chiesa, 2020). This performance-based approach, standardised into the need-performance methodology – see (Cavaglià *et al.*, 1975) and UNI standards – has already been supported since the mid-20<sup>th</sup> century by Giuseppe Ciribini (Bosia, 2013), taking into account expert systems (Ciribini, 1968) and the Wiener cybernetic approach (Wiener, 1988). Nevertheless, the performative design

loro uso richiede conoscenze specifiche che ne limitano l'applicabilità nell'azione progettuale. Tra questi EnergyPlus è uno dei software più diffusi (Brackney *et al.*, 2018) ed è dotato di interfacce grafiche a supporto del suo uso architettonico, tra cui Open Studio, DesignBuilder e Ladybug Tools. Tali interfacce CAD/BIM di front-end permettono all'utente di generare un modello di un edificio e di modificare gli *input* (es. rimuovere un muro o cambiare i materiali), mentre il software compila in *back-end* (funzionalità non visibili all'utente) i file di input di EnergyPlus (IDF) che sono estremamente specialistici (file ASCII). Tali *software*, tuttavia, presentano limitazioni nell'uso parametrico per supportare scelte progettuali e, senza scrivere appositi codici, non permettono di comparare l'uso monitorato e l'uso simulato di un edificio (*performance-gap*) aiutando i professionisti a comprendere eventuali problematiche di esercizio. Si evidenzia, inoltre, una crescente domanda di tool basati su interfacce a riga di comando capaci di esplorare le istanze dei modelli EnergyPlus senza la necessità di agire manualmente sugli input tramite interfacce CAD o BIM. I principali vantaggi sono: un accesso più semplice (e massivo) alle modifiche nei modelli per studi parametrici per testare scenari progettuali e operativi complessi; l'uso di linguaggi di programmazione emergenti (es. Python) aprendo a maggiori connessioni tra i sapori informatici e l'architettura; l'elevata flessibilità nel testare nuove procedure metodologiche (es. integrando *machine learning*, reti neurali, modelli surrogati); un facile sviluppo di indicatori di performance (KPI) personalizzati per la progettazione tecnologico-ambientale; e l'integrabilità con sistemi di monitoraggio IoT (*Internet of Things*). Tra i progetti esistenti, si possono citare: Eppy, libreria per l'editing di modelli IDF, Geomeppy,

BESOS e JEPlus. Tali *software*, tuttavia, richiedono un'avanzata conoscenza dei linguaggi di programmazione e delle complesse strutture logiche degli input file di EnergyPlus. Diversamente, il tool proposto in questo articolo supporta tali vantaggi senza richiedere al progettista conoscenze informatiche o della struttura del codice di EnergyPlus.

L'articolo introduce una nuova piattaforma a supporto del progetto e dell'analisi operativa di edifici abilitando il progettista a prefigurare e studiare i potenziali impatti che diversi parametri di progetto e gestione degli edifici hanno su indicatori energetici e di *comfort*, analizzando l'efficienza di numerosi scenari. Tale strumento è stato sviluppato dagli autori nell'abito di due attività finanziate da progetti EU H2020. La prima attività ("DYCE") comprende la definizione teorica dell'architettura software della piattaforma e co-supporta lo sviluppo di alcuni scenari di uso relativi ad analisi di sensitività e calibrazione dei modelli, cui si aggiunge il calcolo automatico del *performance gap*, comparando l'uso standardizzato degli edifici – es. UNI EN 16798-1 – con i comportamenti monitorati reali. La seconda attività ("PRE") introduce ulteriori potenzialità progettuali, includendo ulteriori tecnologie e indicatori di performance bioclimatici al fine di supportare il professionista ad analizzare la resilienza climatica di scelte e scenari progettuali e operativi e l'applicabilità di soluzioni passive per il raffrescamento e il riscaldamento degli edifici. Tale seconda attività aggiunge al tool nuovi scenari di uso predittivi per l'ottimizzazione degli attuatori negli edifici suggerendo in anticipo agli utenti le configurazioni degli elementi attivi dell'involucro (es. schermature solari mobili, ventilazione naturale). L'articolo si focalizza sugli usi architettonici relativi all'attività "DYCE".

vision is now envisaging a new era, as underlined by several researchers (de Wilde, 2018; Esposito and Bosi, 2021). New advanced potentialities are emerging thanks to the progressive adoption of a coding-based methodology, which allows real-time analysis by combining multiple data sources and massive data production via IoT, Cloud monitoring and massive simulation approaches (Chiesa *et al.*, 2019; Besuievsky *et al.*, 2021). This new dimension requires a multidisciplinary approach to support the design process with new instruments, whose potentialities do not substitute the primary role of the architects. These tools are, nowadays, managed by interoperable platforms that manage multi-data sources and interrelate different coding languages, supporting co-simulations and forecasting thanks to a co-design and co-building man-

agement vision (Shahinmoghadam, Natephra and Motamedi, 2021). They focus on building energy behaviours, despite the many building dynamic energy simulation software available, which allow to quantify both energy and comfort impact of different design choices. Their use requires specific knowledge that limits their applicability in the design action. Among them, EnergyPlus is one of the most widely used software (Brackney *et al.*, 2018), including numerous graphical interfaces, such as OpenStudio, DesignBuilder and Ladybug Tools. These graphical CAD/BIM front-end interfaces are essential to create an initial building model that integrates geometry, and to actuate geometry changes (e.g. removing a wall or changing materials). At the same time, the tool compiles in the back-end (functions hidden to the user) the

EnergyPlus input files (IDF) that are highly specialised (ASCII files). However, these tools show high limits in their parametric usability to support design choices. Additionally, without specific coding development, they do not allow to compare monitored and simulated building behaviours (*performance gap*), which is necessary to help professionals understand building operational problems. There is also an increasing demand for coding-based tools that automatically explore EnergyPlus model instances without manually changing model inputs via CAD/BIM interfaces. The main advantages of coding tools are: easier (and massive) access to minor model modification for parametric analysis testing of complex design and operational scenarios; use of emerging programming languages (e.g. Python), allowing to better connect IT devel-

opers to the architectural scene; the flexibility to test new methodological procedures (e.g. integrating machine learning, neural networks, surrogate modelling); easy development of personalised key performance indicators (KPIs) for environmental-technological design; and integration with IoT monitoring systems (*Internet of Things*). Among the existing projects, it is possible to mention: Eppy, an IDF editing library, Geomeppy, BESOS, and JEPlus. Nevertheless, these tools require advanced knowledge of specific coding languages and the complex structure of EnergyPlus input files. Conversely, the tool proposed in this paper supports these advantages without needing the architect to know IT languages or the EnergyPlus input structure.

This paper introduces a new platform supporting building design and opera-

## Introduzione al nuovo tool

Il tool PREDYCE (Python Realtime Energy DYnamics and Climate Evaluation) si basa sull'integrazione di tre moduli indipendenti sviluppati dagli autori, che consentono:

1. la modifica automatica di modelli energetici degli edifici (involucro, attività, tecnologie, ...),
2. l'esecuzione parallelizzata massiva di simulazioni energetiche in EnergyPlus,
3. il calcolo organizzato di numerosi indicatori di performance, con la possibilità di integrare dati monitorati.

Il tool è capace di integrare competenze ICT in una chiave abilitante per il professionista (progetto e gestione degli edifici) agendo come strumento tecnologico di mediazione tra il codice informatico, la conoscenza di specifici tecnicismi, quale ad esempio la gestione avanzata di simulazioni energetico-dinamiche in EnergyPlus, e un'interfaccia idonea all'uso nell'ambito architettonico degli stessi. Tale approccio supporta la convergenza di specialismi verso una visione aperta e corale per l'ottimizzazione efficace di soluzioni progettuali e di gestione degli edifici in fase operativa. L'utente si interfaccia con semplici strumenti di definizione delle scelte progettuali, mentre il tool elabora in *back-end* codice e simulazioni per restituire in *front-end* direttamente le performance espresse tramite indicatori noti. Sfruttando queste potenzialità è stato possibile lo sviluppo di diversi scenari d'uso orientati a supportare azioni specifiche progettuali-operative. La facile interoperatività, la struttura aperta, espandibile e integrabile della libreria, permettono alla stessa di essere impiegata come tecnologia capace di prefigurare e supportare decisioni in diversi ambiti: dallo studio degli impianti energetici di possibili azioni di retrofit, alla cali-

brazione del modello, all'analisi *real-time* del comportamento operativo reale di un edificio rispetto allo standard previsto. La stessa è strutturata per supportare, tramite API (*Application Programming Interface*), il suo utilizzo remoto, permettendone l'integrazione in piattaforme decisionali o di smart building management. Il tool è pensato come ausilio al progettista e non come sua sostituzione, lasciando allo stesso la possibilità di controllare i parametri e identificare gli indicatori da restituire supportando e non proponendo scelte progettuali. Alcune specifiche applicazioni sono, inoltre, reiterate automaticamente dalla piattaforma, ad esempio per restituire ai gestori energetici degli edifici eventuali discrepanze di performance aiutandoli a definire quando intervenire.

La Figura 1 mostra il flusso dati input/output semplificato di un generico scenario d'uso di PREDYCE. Il flusso di calcolo interno e la gestione della simulazione risultano nascoste all'utente finale a cui sono restituiti gli output contenenti gli indicatori richiesti. Le personalizzazioni di ogni esecuzione, considerando gli output e gli input desiderati, sono specificate all'interno di un file di gestione del software in formato JSON gestito dal progettista. Attualmente la compilazione di tale file richiede la conoscenza (tramite manuale) delle funzioni disponibili all'interno del tool (es. aggiungi cappotto termico). Scenari d'uso precompilati e la futura integrazione in una interfaccia possono ulteriormente semplificare tale procedura. Per quanto riguarda i file meteorologici, è stato sviluppato un ulteriore modulo per la creazione automatica di file climatici a partire da dati monitorati, es. da una stazione meteorologica. I risultati ottenuti per ogni simulazione vengono salvati in due file strutturati: uno contenente risultati aggregati sul periodo

tional management choices. It enables designers to prefigure and study the potential impact of design and building management decisions on energy and comfort indicators to check the efficiency of several scenarios. The authors developed this tool thanks to two actions funded by two EU H2020 projects. The first developing action ("DYCE") refers to the theoretical definition of the tool's architecture, and jointly supports the development of some usage scenarios related to sensitivity analyses and model calibration, also defining a performance gap scenario by comparing standard building uses – e.g. EN 16798-1 – with monitored actual behaviours. The second developing action ("PRE") introduces new design potentialities, including other low-energy technologies and bioclimatic design key performance indicators to support professionals in an-

alysing the climate resilience of design and operational scenarios, and the local applicability of passive heating and cooling solutions. The latter activity enhances the tool with new predictive usage scenarios to optimise actuators in the buildings by suggesting to the users the configurations of active envelope systems (e.g. movable shading and natural ventilation). This paper focuses on architectural usage scenarios related to the first developing action.

### Introduction to the new tool

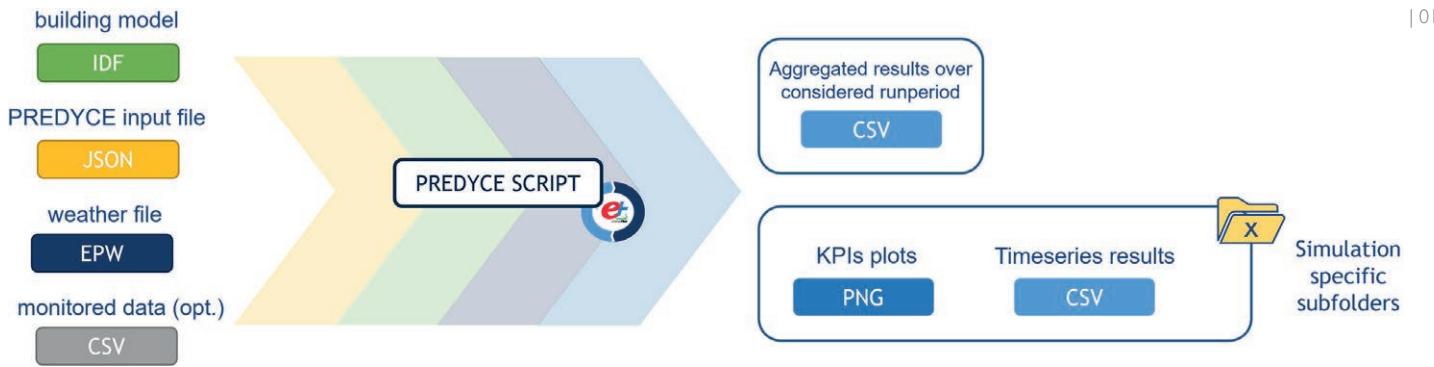
The PREDYCE (Python Realtime Energy DYnamics and Climate Evaluation) tool is based on three interconnected but independent modules developed by the authors, which allow the following:

1. Automatically modify building energy models (envelope, activities, technologies, ...),

2. Run a massive number of simulations in parallel,
3. Compute several KPIs, with the possibility of integrating monitored data.

The tool can integrate ICT competencies to support professionals (both in building design and management phases), acting as a technological medium between coding, technical specialist knowledge, including advanced management of the dynamic energy simulation process in EnergyPlus, and a graphic interface devoted to support their architectural usages. This approach combines field-specific knowledge in a choral vision to optimise building design and management phases. The user interfaces with simple instruments to define design choices, while the tool processes in the back-end the needed code and simulations to return to the front-end performance

es expressed using known indicators. By exploiting these potentialities, different usage scenarios were developed to help specific design and operative actions. The proposed Python library's interoperability, flexibility, and modularity allow its use in other application cases, supporting decision-making processes. It can be controlled to analyse the impact of retrofit solutions on energy indicators, to calibrate the model, and to compare simulated standard building behaviours with actual ones in almost real-time. A developed API (*Application Programming Interface*) also allows for remote use of the library, allowing the integration with platforms supporting decision-making or smart building management and design choices. The tool is conceived as a support to architects without substituting them, allowing the professionals to control parametri-



temporale considerato, l'altro contenente serie temporali con risoluzione personalizzabile (es. oraria). Grazie alla struttura del file finale, eventuali correlazioni possono essere facilmente individuate dal progettista tramite azioni di post-analisi, e grafici personalizzati generati in modo semplice e automatizzato. Tale possibilità permette al professionista di valutare i risultati secondo strumenti e indicatori propri del proprio sapere disciplinare (es. diagrammi bioclimatici, ore di *discomfort*, fabbisogni energetici).

La soluzione proposta è fortemente innovativa e originale supportando la convergenza e l'integrabilità di competenze multidisciplinari (progettuali, tecnologiche, informatiche, ICT) in fase di progettazione e gestione degli edifici senza aumentare la dimensione strumentale o la complessità di uso da parte dell'utente finale. Il tool è un nuovo strumento tecnologico interattivo a servizio degli esperti di settore per una valutazione energetica e bioclimatica degli edifici studiato per l'integrazione in piattaforme commerciali a supporto della gestione smart degli edifici, come evidenziato dai test in corso in diversi paesi europei e in numerosi casi studio.

cal input variations and to identify the required output indicators. The library supports and does not propose design choices. Some specific applications are automatically reiterated by the platform, e.g. to return to energy managers potential energy discrepancies, supporting them in defining when an intervention is needed.

Fig. 1 shows a generic usage scenario input/output workflow of PREDYCE. Internal computations and the management of simulations are hidden from final users, who receive as output the desired KPIs. An input JSON file managed by the professional contains all details to personalise the request, from selected KPIs to parametric inputs modifying the building model. It is currently compiled by exploiting a user manual to know the tool's available functions, e.g. *adding wall thermal insulation*. Still, predefined use cases

and integrating the JSON compiling in a graphic interface could simplify the procedure. An extra module has been designed to generate EPW files (simulation weather files) from monitored data, e.g. by weather stations. Results of each simulation are saved in two structured CSV files: one containing aggregate KPIs over the considered run period, and the other containing time-series results with defined resolution (e.g. hourly). Thanks to the tabular output structure, correlations can be easily found with post-analysis, while graphical plots are automatically generated. Hence, professionals can interpret results according to KPIs and instruments of their field-specific background, e.g. bioclimatic charts, number of discomfort hours, and energy needs. The proposed solution is highly innovative in integrating multidisciplinary

## Potenziali ambiti di applicazione

## Scenari d'uso per il progetto E-DYCE

Il primo scenario di applicazione consente di semplificare e velocizzare l'analisi d'impatto che la variazione di parametri progettuali ha su indicatori di performance definibili dall'utente. Ad esempio, la Figura 2 mostra sottoforma di *heatmap* la correlazione che intercorre, per uno specifico edificio in regime passivo (giugno-settembre), tra azioni di retrofitting (es. aggiunta di isolante) e modifiche delle strategie di controllo (schermi solari, ventilazione) e le conseguenti performance definite da indicatori di comfort termico (modelli di comfort adattivo – UNI EN 16798-1).

Tra le principali applicazioni di tale scenario vi è l'analisi d'impatto delle diverse scelte di retrofit e di progetto sul comfort termico e sui fabbisogni energetici, supportata dalla possibilità di visualizzare, per ogni simulazione, indicatori grafici come la firma energetica (EN ISO 13790) (Fig. 3).

Il secondo scenario di uso supporta la verifica del modello rispetto a dati monitorati. Nel processo di calibrazione l'esperienza umana sulla scelta dei parametri da variare è difficilmente

competencies (architectural, technological, computer-based, and ICT) in building design and management phases without increasing the instrumental dimension or the complexity of use. The proposed tool is a new interactive technological instrument available for professionals allowing a bioclimatic and energy evaluation of buildings. It can be integrated with commercial platforms devoted to smart building management, in line with current tests in numerous case studies in several European countries.

## Potential application domains

*Usage scenarios for the E-DYCE project*  
The first-use scenario allows to facilitate and speed up the study of how variations in different model parameters impact KPIs defined by the user. For example, Fig. 2 shows the heatmap correlations for a specific building op-

erated in free-running (June-September), showing the interrelations that retrofitting actions (e.g. addition of thermal insulation), and control strategy variations (e.g. solar shading and ventilation) have with thermal comfort performance (adaptive thermal comfort – UNI EN 16798-1).

Among the main applications of this scenario, there is the analysis of the impact that different retrofit and design solutions have on consumption and thermal comfort, thanks to the possibility of plotting for each simulation graphical KPI visualisations, such as the energy signature (EN ISO 13790) (Fig. 3).

The second usage scenario supports building model verification against monitored data. The human experience of choosing the parameters to be varied is still hard to substitute with automated actions during the calibra-

02| Applicazione di PREDYCE a supporto del progettista confrontando l'effetto di azioni di retrofitting (isolamento termico, sostituzione serramenti) e soglie di controllo (schermi solari, raffrescamento ventilativo) su indicatori di comfort termico. Regime di free-running estivo (giu-set). I numeri sono coefficienti di correlazione [+1;-1].

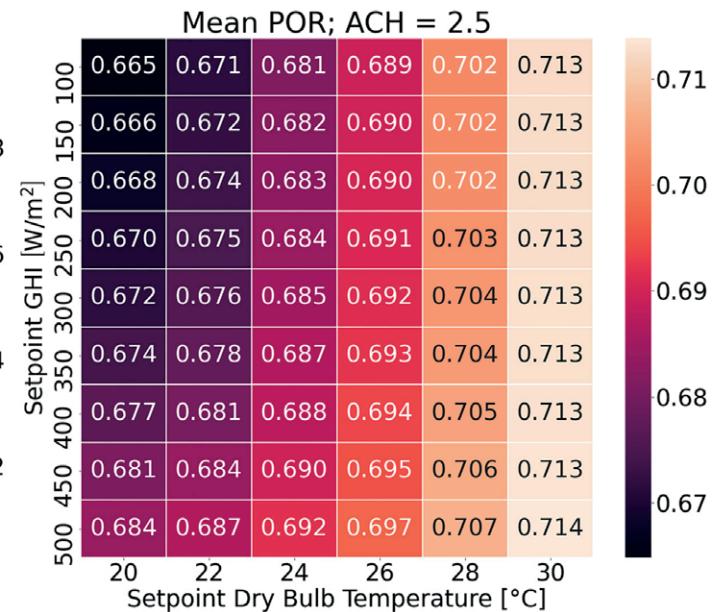
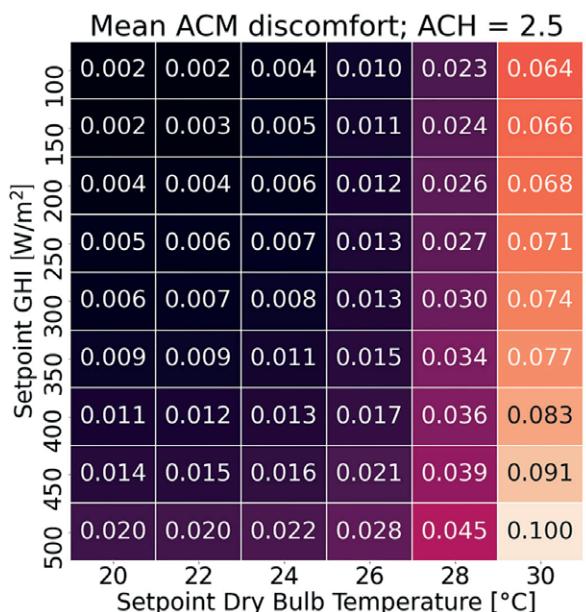
PREDYCE's application supports designers in comparing the effect that retrofitting actions (thermal insulation, window change) and control thresholds (solar shading, ventilative cooling) have on thermal comfort indicators. Summer free-running mode (Jun-Sep). Numbers are correlation factors [+1;-1]

03| Firme energetiche 1-D e 2-D (EN 15603, UNITS 11300) con dati aggregati settimanalmente ottenute applicando PREDYCE ad uno degli edifici demo di progetto 1-D and 2-D energy signatures (EN 15603, UNITS 11300) with weekly data aggregation calculated by PREDYCE on an actual demo building

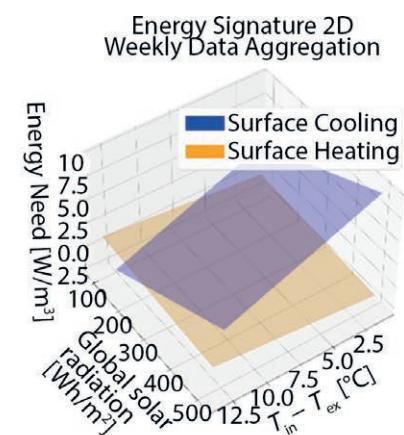
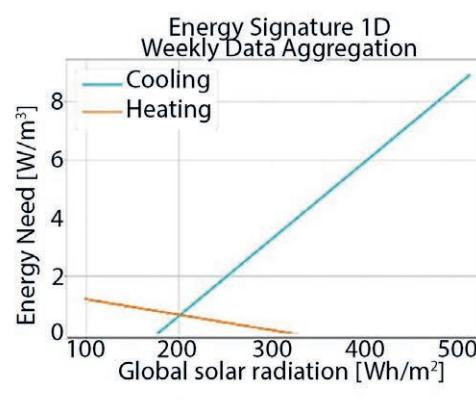
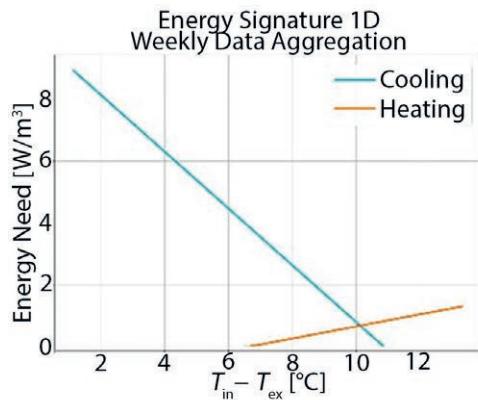
sostituibile da un processo automatizzato, ma strumenti capaci di modificare automaticamente i parametri di simulazione e di restituirlne l'errore può aiutare a velocizzare tale azione. La procedura utilizzata dal tool consiste nella minimizzazione delle differenze statistiche tra il database monitorato e quello simulato nelle stesse condizioni di contorno al variare di parametri di modellazione definiti dall'utente. I risultati sono restituiti tramite visualizzazioni grafiche, quale ad esempio la firma di calibrazione, in linea con metodologie definite dall'IBSA (Hensen and Lamberts, 2019). I modelli calibrati sono fondamentali per poter supportare il professionista nelle decisioni riguardanti il retrofit energetico degli edifici e la loro gestione operativa. Infine, è stato sviluppato uno scenario di uso per analizzare il

divario nei risultati di performance di un edificio, confrontando automaticamente dati reali misurati e simulazioni effettuate in condizioni meteorologiche reali, ma considerando condizioni d'uso standard o adattate a specifici profili d'uso (*digital twin*). Lo scenario è stato sviluppato considerando la sua potenziale utilità a supporto sia dei professionisti nella gestione degli edifici, sia degli abitanti, permettendo di ricevere *feedback* più frequenti e realistici di quanto non sia possibile tramite gli attuali strumenti di diagnostica e certificazione energetica. Diversi indicatori di performance possono essere calcolati sia sui dati monitorati, sia sui risultati di simulazione, restituendo un differenziale prestazionale tra i due ambiti. Lo scenario è stato pensato per permettere la simulazione dell'edificio considerando

02 |



03 |



rando diverse modalità d'uso e scenari di ottimizzazione. Tale strumento permette di modificare profili di utilizzo (es. occupazione, impianti, servizi) e rispettivi parametri di controllo (es. utilizzo dei termostati) al fine di evidenziare eventuali discrepanze tra l'aspettativa di progetto basata su utenze e climi standard e un uso realistico degli edifici. Tra gli usi in corso di test si ricorda il supporto informato a gestori energetici e abitanti per ottimizzare strategie e suggerimenti comportamentali atti a ridurre i consumi nel tempo e a migliorare il comfort nelle unità spaziali.

#### Esempi di indicatori di performance

Il tool sviluppato consente il calcolo di indicatori di performance applicabili a dati monitorati e simulati. Tali indicatori sono restituiti sia numericamente, sia tramite specifici grafici, integrando, in accordo con le normative europee, indicatori non calcolabili in modo diretto tramite EnergyPlus, quali ad esempio la firma energetica degli edifici, che consente di correlare i consumi con variabili ambientali, e il calcolo dell'energia primaria globale in linea con le UNI/TS 11300. Sono stati inclusi nel nuovo tool numerosi indicatori di comfort termico, incluso il modello di Fanger (Fanger, 1972) – UNI EN ISO 7730 – e il comfort adattivo (Humphreys, Nicol and Roaf, 2020) – UNI EN 16798-1 (Fig. 4).

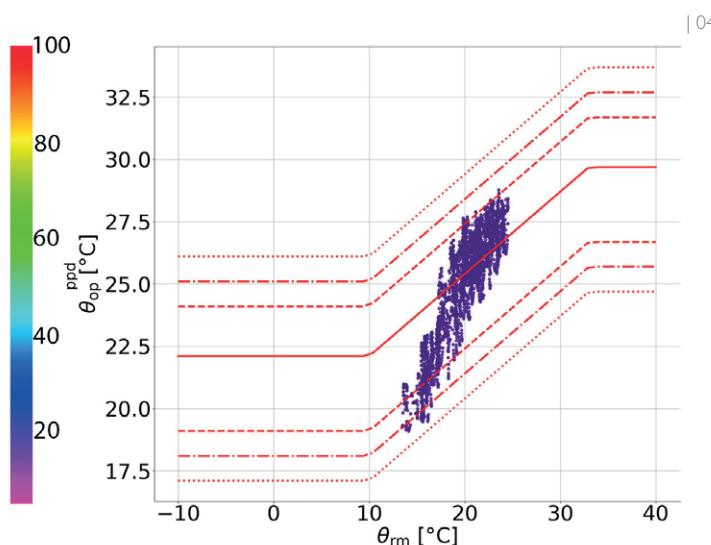
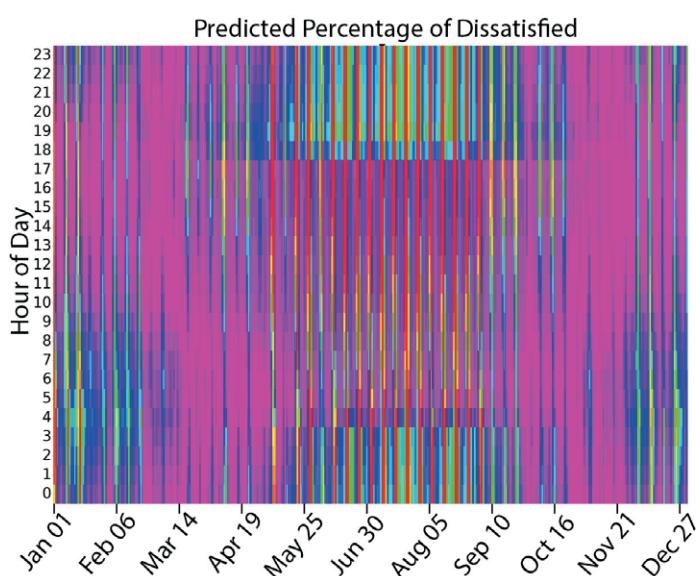
Lo scenario "PRE" permette inoltre la restituzione dei risultati su diagrammi bioclimatici.

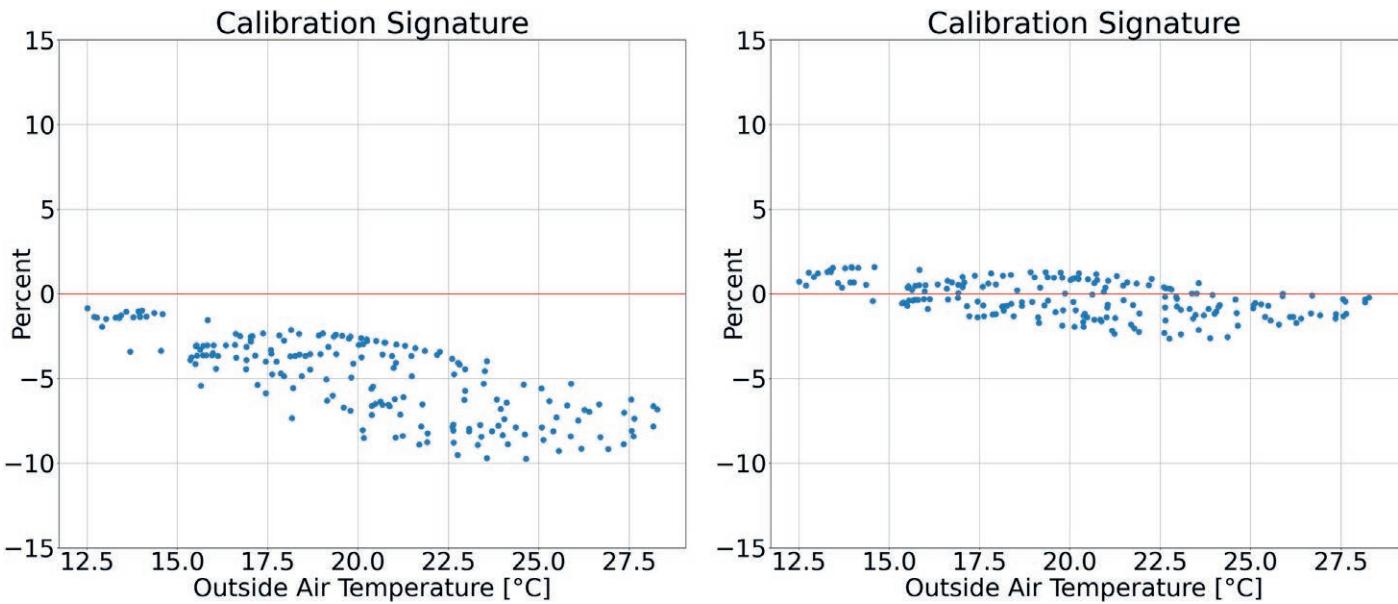
Infine, sono stati introdotti nuovi indicatori, quali ad esempio il consumo fittizio di riscaldamento/raffrescamento, che intende tradurre il *discomfort* termico degli edifici in regime passivo in

termini di fabbisogno energetico equivalente per valorizzare la corretta progettazione dell'involturo e l'adozione di strategie bioclimatiche. Per quanto concerne gli indicatori riferiti alla qualità dell'aria, sono presi in considerazione, ad esempio, il numero di ore occupate in cui la concentrazione di  $\text{CO}_2$  è superiore a determinate soglie di *discomfort* (es. 1000 ppm) o inferiore a determinate soglie di accettabilità (es. 600 ppm) al fine di limitare la sovra-ventilazione invernale.

#### Applicazioni in casi studio europei

Gli scenari d'uso presentati sono in fase di test nell'ambito del progetto europeo H2020 EDYCE su diverse tipologie di edificio (residenziali – casa singola, casa a schiera, multi-appartamento – e terziari – edifici scolastici) integrando la ricerca di senso e visione propria della tecnologia dell'architettura con l'ambito normativo, la certificazione energetica, gli smart building e le nuove dimensioni prestazionali. Tra gli utenti coinvolti si citano abitanti, gestori degli edifici, progettisti, amministratori e società informatiche. Risultati promettenti sono stati ottenuti nei diversi scenari di uso nel corso dei primi due anni di monitoraggio e test della piattaforma, ad esempio per la valutazione in tempo reale del performance gap rispetto ad un uso standard dell'edificio. Lo scenario di supporto alla calibrazione è stato ampiamente testato su numerosi edifici, prendendo in esame diverse variabili obiettivo di calibrazione (temperatura, concentrazione di  $\text{CO}_2$ , consumi energetici), ottenendo ottimi risultati anche in termini di tenuta nel tempo dei modelli calibrati. Tali test hanno permesso di sottolineare la capacità del tool di semplificare il pro-





cesso di studio e utilizzo dei modelli per la simulazione energetica da parte delle diverse figure progettuali e gestionali degli edifici. La Figura 5 mostra l'applicazione di tale strumento su un edificio residenziale sito in un comune pedemontano del Piemonte riportando i risultati raggiunti in termini di firma di calibrazione.

Similmente, la Figura 6 dimostra la capacità del modello calibrato di replicare l'andamento dell'edificio reale (dati monitorati) nel tempo permettendo al progettista di simulare l'impatto

di scenari progettuali e operativi su un modello di edificio allineato al suo reale funzionamento.

### Conclusioni e futuri sviluppi

La piattaforma PREDYCE qui introdotta è in corso di continuo sviluppo da parte degli autori.

Test sono condotti in edifici monitorati posizionati in diversi paesi europei resi disponibili da enti locali, grandi e piccole medie imprese, ed altri enti di ricerca. È anche in corso di test l'integra-

tion process. Still, the possibility of speeding up the analysis of parameter impact on errors by automatically comparing simulated and monitored data can improve the process. The adopted procedure minimises statistical differences between monitored and simulated data under the same environmental conditions by varying model parameters defined by the user. Results are returned through graphical visualisations, such as the calibration signature, in line with methodologies suggested HVAC by IBSA (Hensen and Lamberts, 2019). Calibrated models are essential to support architects in energy retrofitting and building management choices correctly.

Finally, a usage scenario devoted to analysing the performance gap between simulated and monitored building behaviour under the same weather conditions has been developed, consider-

ing both standard model inputs and adapted user profiles (digital twin). This scenario has been developed considering its potential to support both building management professionals and final users in receiving more frequent and realistic feedback than possible with existing energy certification and diagnostic tools. Many KPIs can be computed on monitored data and simulation results, returning a performance differential between the two environments. This scenario has been developed to simulate the building by considering different usage profiles (e.g. occupancy, HVAC, activities) and their control parameters (e.g. thermostats) to highlight discrepancies between attended design behaviour based on standard usage and weather, and actual uses. This allows to develop new strategies, and suggests behavioural patterns to companies and ten-

ants to reduce consumption over time and improve indoor comfort.

#### Sample performance indicators

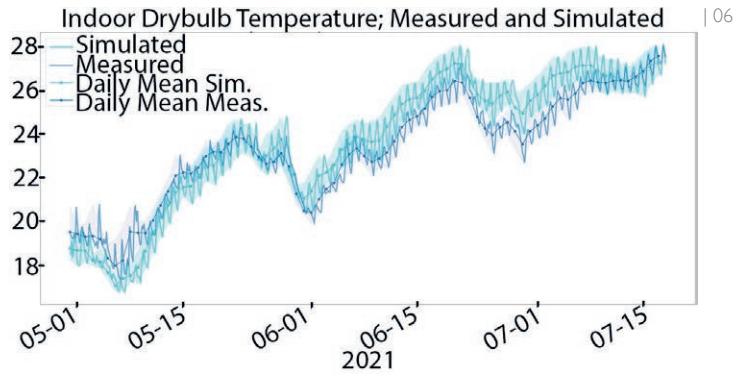
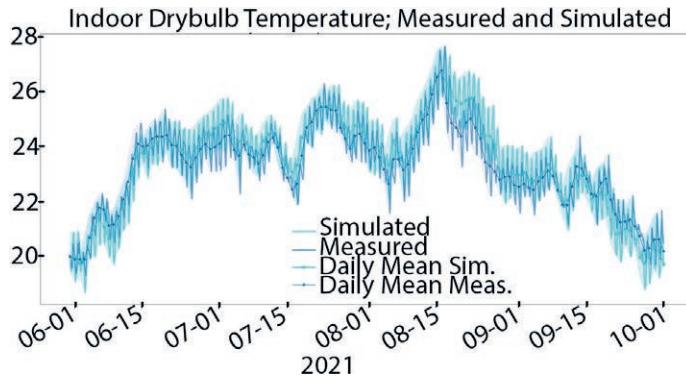
The tool proposed allows the computation of several KPIs on both simulated and monitored data. Performance indicators are returned numerically and through plots, adding, in line with European regulations, additional KPIs not directly available in EnergyPlus, e.g. the energy signature, which correlates environmental variables with consumption, and the primary energy, in line with UNI/TS 11300. Several thermal comfort KPIs are available – e.g. the Fanger model (Fanger, 1972) – UNI EN ISO 7730 – and the adaptive comfort model (Humphreys, Nicol and Roaf, 2020) – UNI EN 16798-1 (Fig. 4). The “PRE” action also includes bioclimatic charts.

New KPIs have been introduced, such

as fictitious heating/cooling, which intends to correlate the thermal discomfort of free-running buildings to equivalent energy needs, enhancing the importance of correctly designing building envelopes and bioclimatic strategies. Indoor air quality KPIs can also be retrieved, e.g. the number of occupied hours in which CO<sub>2</sub> concentration is above discomfort thresholds (e.g. 1000 ppm) or below defined values (e.g. 600 ppm) to avoid over ventilation in wintertime.

#### Sample applications on EU demo cases

Described usage scenarios are being tested in the EU project H2020 E-DYCE by considering different building typologies (residential – detached houses, terraced-house, multi-apartment – and tertiary buildings – schools), and by integrating



zione del tool in piattaforme di interscambio dati proprietarie, capaci di gestire in remoto, tramite intelligenza artificiale, sistemi avanzati di smart building. Il tool è soggetto a limitazioni e rischi propri delle simulazioni energetico dinamiche, necessitando di una buona esperienza, da parte dell'utilizzatore, per costruire correttamente i modelli iniziali degli edifici. In aggiunta, il tool è attualmente gestito da un file di controllo delle simulazioni che, per quanto compilabile dai progettisti senza dover conoscere linguaggi di programmazione, non è ancora dotato di un'interfaccia utente semplificata o integrata con la modellazione geometrica iniziale. Infine, è necessario da parte dell'utilizzatore mantenere una forte capacità di analisi critica dei risultati in base agli input definiti di progetto per evitare usi impropri dello strumento o errori nella fase di predisposizione del modello.

Tra i diversi ambiti di sviluppo relativi al progetto E-DYCE di sottolineano: 1. la futura generazione di strumenti e metodi per implementare e valorizzare il tema della certificazione energetica degli edifici integrando soluzioni ICT, design/asset/tailored rating e la valorizzazione del potenziale passivo/bioclimatico degli edifici; 2. il mercato degli smart building e lo sviluppo di soluzioni di ottimizzazione predittive degli edifici. Tra i futuri sviluppi del tool, si sottolinea la necessità di arricchire l'interfaccia utente, ad esempio integrandola in ambienti CAD (es. Rhinoceros), e di includere la possibilità di supportare lo sviluppo di modellazioni *black box*, *reinforcement learning*, nuove librerie di ottimizzazione multi-variabile e ulteriori scenari di uso.

the definition of significance and visions of architectural technology with regulations, energy certification, smart buildings, and the new performance-driven dimensions. Tenants, building managers, designers, administrators, and ICT companies can be mentioned among involved end-users. Promising results have been obtained for the different usage scenarios during the first two years of monitoring and testing the platform, e.g. to evaluate the real time performance gap between actual building use and simulated standard use. The calibration scenario was also tested considering numerous buildings, using several measured variables as calibration target (temperature, CO<sub>2</sub> concentration, heating needs), obtaining excellent results, and considering long-term correspondence between monitored and simulated data. Such tests demonstrated the tool's ability

to significantly facilitate analyses and usage of energy simulation models by various building design and management professionals. Fig. 5 shows the calibration scenario applied to a building in a mountain municipality in Piedmont (North Italy), reporting the calibration signature for a residential case study. Fig. 6, instead, shows the long-term correspondence between the calibrated model and measured data allowing architects to simulate the impact of design and operative scenarios on a building model aligned with the actual building behaviour.

#### Conclusions and further research

The proposed PREDYCE tool is under constant development by the authors. Tests are performed in monitored buildings in various European countries in collaboration with local societies, small and medium enterprises,

and research centres. Moreover, the tool integrates with a proprietary middleware platform, and is being tested for remote handling through artificial intelligence algorithms and advanced smart building systems. The tool is subject to limitations and risks connected to adopting dynamic energy simulations, needing a good user experience to define the initial simulation model correctly. Currently, the tool is managed by an input file that, despite being easy to compile by design professionals without requiring programming knowledge, is not currently linked to a graphical interface connected to the initial geometrical definition of the model. Finally, the user needs to maintain a high critical capability of analysing results, considering the defined design inputs to avoid bad usage of the instrument or wrong initial considerations.

The main future development paths of the tool for E-DYCE are: 1. the future generation of tools and methods to update and enhance the applicability of building energy certifications, integrating ICT solutions, design/asset/tailored rating, and passive/bioclimatic potential; 2. Smart building market and developing predictive optimisation solutions. Future developments need to enhance user interface options, e.g. integrating already existing CAD tools (e.g. Rhinoceros), including black box modelling algorithms, reinforcement learning, multi-objective optimisation libraries, and new usage scenarios.

#### ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGEMENTS, COPYRIGHTS

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation pro-

## ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

La ricerca è finanziata dall'Unione Europea, grant agreement No 893945, EU H2020 research and innovation programme H2020-LC-EE-2019 (azione DYCE), P.I. unità locale prof. Chiesa. Contributi: Concettualizzazione, cura dei dati, elaborazioni software e validazione (tutti), supervisione e acquisizione fondi (GC).

## REFERENCES

- Besuievsky, G. *et al.* (2021), "Procedural modeling buildings for finite element method simulation", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2042, n. 1, p. 012074.
- Bosia, D. (Ed) (2013), *L'opera di Giuseppe Ciribini*, FrancoAngeli, Milano.
- Brackney, L. *et al.* (2018), *Building energy modeling with openstudio*, Springer, New York.
- Cavaglià, G. *et al.* (1975), *Industrializzazione per programmi. Strumenti e procedure per la definizione dei sistemi di edilizia abitativa*, RDB, Piacenza.
- Celanto, D. (2007) "Innovate or Perish: New Technologies and Architectures Future", *Harvard Design Magazine*, Vol. 26, available at: <http://www.harvarddesignmagazine.org/issues/26/innovate-or-perish-new-technologies-and-architectures-future> (accessed on 5/09/2022).
- Chiesa, G. *et al.* (2019), "Parametric Optimization of Window-to-Wall Ratio for Passive Buildings Adopting A Scripting Methodology to Dynamic-Energy Simulation", *Sustainability*, Vol. 11, n. 11, p. 3078.
- Chiesa, G. (2020), *Technological paradigms and digital eras: data-driven visions for building design*, Springer, Cham.
- Ciribini, G. (1968), *Brevi note di metodologia della progettazione architettonica*, Edizioni Quaderni di Studio, Torino.
- Droege, P. (2006), "The Renewable City: Dawn of an Urban Revolution", *Bulletin of Science, Technology & Society*, Vol. 26, n. 2, pp. 141-150.
- Esposito, M.A. and Bosi, F. (2021), "The Green Design Approach Digital Innovation Facility: BIM and New Industrial Processes", in Chiesa, G. (Ed) *Bioclimatic Approaches in Urban and Building Design*, Springer, Cham, pp. 439-485.
- Fanger, P. (1972), *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- Ghirri, L. (2021), *Niente di antico sotto il sole. Scritti e interviste*, Quodlibet, Macerata.
- Girardet, H. (2008), *Cities people planet: urban development and climate change*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Chichester.
- Hensen, J. and Lamberts, R. (Eds) (2019), *Building performance simulation for design and operation*, 2nd ed., Routledge, Abingdon.
- Humphreys, M.A., Nicol, F. and Roaf, S. (2020), *Adaptive thermal comfort: foundations and analysis*, Routledge, Abingdon.
- Oxman, R. (2006), "Theory and design in the first digital age", *Design Studies*, Vol. 27, n. 3, pp. 229-265.
- Sennett, R. (2008), *The craftsman*, Yale University Press, New Haven.
- Shahinmoghadam, M., Natephra, W. and Motamedi, A. (2021), "BIM- and IoT-based virtual reality tool for real-time thermal comfort assessment in building enclosures", *Building and Environment*, Vol. 199, p. 107905.
- Wiener, N. (1988), *The human use of human beings: cybernetics and society*, Da Capo Press, New York.
- de Wilde, P. (2018), *Building Performance Analysis*, John Wiley & Sons, Chichester.

gramme H2020-LC-EE-2019, under grant agreement No 893945 (E-DYCE) ("DYCE" action), local unit P.I. prof. Chiesa. Contributors: Conceptualisation, data management, software, validation (all), supervision and funding acquisition (GC).

# Tecnologie abilitanti per supportare la transizione energetica nell'ambito dell'edilizia sociale

RICERCA E  
Sperimentazione/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION

Jacopo Gaspari, <https://orcid.org/0000-0002-8361-2963>  
Ernesto Antonini, <https://orcid.org/0000-0001-9055-6149>  
Lia Marchi, <https://orcid.org/0000-0002-2009-576X>  
Dipartimento di Architettura, Università di Bologna, Italia

[jacopo.gaspari@unibo.it](mailto:jacopo.gaspari@unibo.it)  
[ernesto.antonini@unibo.it](mailto:ernesto.antonini@unibo.it)  
[lia.marchi3@unibo.it](mailto:lia.marchi3@unibo.it)

**Abstract.** L'edilizia abitativa svolge un ruolo chiave nel percorso globale verso la transizione energetica e a tal fine il retrofitting degli edifici rappresenta un importante asset. Nonostante le misure di sostegno e gli incentivi, il tasso degli interventi di trasformazione è ancora troppo lento. Ciò in particolare per l'edilizia sociale, a causa delle peculiari complessità e delle limitate risorse pubbliche da cui in Italia dipende. Lo studio propone uno strumento predittivo in grado di facilitare il processo decisionale, permettendo il confronto dei livelli di performance che possono raggiungere le diverse azioni di retrofitting, in funzione delle caratteristiche dell'edificio, dei costi di intervento, dei tempi e della disponibilità delle risorse. Lo strumento è testato su un caso studio di edilizia sociale a Bologna, nell'ambito di uno studio svolto in collaborazione con ACER Bologna.

**Parole chiave:** Tecnologie abilitanti; Transizione energetica; *Housing* sociale; Strumento predittivo; Interazione edificio-utente.

## Introduzione

Il conseguimento di una rapida ed efficace transizione energetica rappresenta uno dei pilastri fondamentali per far fronte agli impatti del cambiamento climatico. L'Unione Europea (UE) riconosce la tecnologia come potente strumento per raggiungere questo traguardo (Commissione Europea, 2019), in particolare con riferimento al settore delle costruzioni, che rappresenta uno degli asset più rilevanti e critici per la transizione. Da un lato, gli edifici sono responsabili globalmente di oltre un terzo del consumo totale di energia finale e di circa il 37% delle emissioni correlate di CO<sub>2</sub> (IEA, 2021a, 2021b). Dall'altro, si stima che il settore possieda uno dei maggiori potenziali di riduzione dell'energia e delle emissioni, grazie alla flessibilità della domanda che lo alimenta (Levine *et al.*, 2007; McKinsey & Company, 2009). Nonostante gli investimenti crescenti che si registrano in tutto il mondo per migliorare l'efficienza energetica degli edifici, l'A-

genzia Internazionale dell'Ambiente stima che entro il 2030 la spesa debba triplicare, per aumentare il tasso di retrofit energetico a circa il 2,5% all'anno, indispensabile per raggiungere lo scenario a emissioni quasi zero entro il 2050 (IEA, 2021a).

Coerentemente con questa prospettiva, il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza Italiano ha assegnato alla rivoluzione verde e alla transizione energetica (Missione 2) oltre un terzo dei 191,5 miliardi di euro di finanziamento previsti (Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2021), destinando alle misure di efficienza energetica e alla riqualificazione dell'ambiente costruito oltre il 25% del finanziamento della Missione (Tab. 1).

L'applicazione del cosiddetto Superbonus, che consiste in una detrazione fiscale del 110% delle spese di riqualificazione energetica (D.L. 34/2020) ha indotto un'accelerazione in questa direzione. Secondo ENEA (2022), al 31 maggio 2022 in Italia erano in corso 172.450 interventi di retrofit, di cui il 15% era relativo a edifici plurifamiliari. In questi ultimi, soprattutto, sono emerse alcune problematiche procedurali – legate a processi amministrativi e decisionali – che limitano la velocità di ristrutturazione del patrimonio, nonché la qualità dei risultati. Sebbene sul mercato siano disponibili diversi metodi e software per supportare la simulazione e la valutazione di azioni di retrofit sulle prestazioni dell'edificio, la loro applicazione è spesso dispendiosa in termini di tempo e non conveniente per i proprietari degli edifici. La massiccia richiesta di riqualificazione energetica beneficierebbe invece di strumenti predittivi veloci, per supportare il processo decisionale su larga scala, mirando a indirizzare gli investimenti verso gli interventi più efficaci o

## Enabling technologies to support energy transition in social housing

**Abstract.** Housing plays a key role in the world path to energy transition, and retrofitting buildings is a major asset to this end. Unfortunately, despite the supporting measures and incentives promoted in many countries, the renovation rate is still too slow. This is even more complex within some specific assets, such as social housing, which, especially in Italy, depends on the availability of public funds. The study proposes a predictive tool conceived as an enabler in the decision-making process, capable of considering and comparing the performance levels that different retrofitting actions can reach, according to building features, intervention costs, timing, and resource availability. The tool is tested on a social housing case study in Bologna.

**Keywords:** Enabling technologies; Energy transition; Social housing; Predictive tool; Building-user interaction.

## Introduction

A fast and effective energy transition is a crucial pillar to cope with the current and future climate change and environmental crisis. The European Union (EU) acknowledges technology as a powerful means to achieve this milestone at multiple levels (European Commission, 2019), particularly with reference to the construction sector, which is one of the most relevant and challenging assets within the process. On the one hand, buildings globally account for over one-third of total final energy consumption, and for about 37% of world energy-related CO<sub>2</sub> emissions, if indirect emissions from electricity, heat and materials used in buildings are included (IEA, 2021a, 2021b). On the other, they are estimated to own one of the largest energy and carbon reduction potential due to their features and flexible demand (Levine *et al.*, 2007; McKinsey & Company, 2009). Despite the recent investments to improve building energy efficiency worldwide, the International Environmental Agency estimates that the expense has to triple by 2030 to boost the energy retrofit rate at about 2.5% per year and reach the Net Zero Emissions Scenario by 2050 (IEA, 2021a). Therefore, according to the EU vision and, especially, with the Next Generation EU plan, the Italian Recovery Plan (PNRR) allocates to the Green revolution and energy transition the highest funds among the six missions (Presidenza del Consiglio dei Ministri, 2021). On a total amount of 191.5 billion euros, M2 is assigned over one third of the funding. As reported in table 1, M2 is split into four sub-missions, where notably energy efficiency measures and the renovation of the built environment receive over 25%

M2	Green Revolution and Ecological Transition	59.47 B€
M2C1	Circular Economy and Sustainable Agriculture	5.27 B€ (8.9%)
M2C2	Renewable Energy, Hydrogen, Network and Sustainable Mobility	23.78 B€ (40.0%)
M2C3	Energy Efficiency and Redevelopment of Buildings	15.36 B€ (25.8%)
M2C4	Protection of the Territory and Water Resources	15.06 B€ (25.3%)

urgenti (Dall’O’ *et al.*, 2020; Housing Europe, 2021). Ciò in particolare nel caso di patrimoni immobiliari estesi ed eterogenei, come quelli dell’edilizia sociale.

#### *La transizione energetica nell’edilizia sociale*

Il patrimonio di edilizia sociale italiano, costituito da circa 900.000 alloggi, pari al 3,8% dello stock abitativo nazionale (Censis, 2008), è un asset particolarmente critico da gestire, nel quale il consumo di energia rappresenta sempre più una questione cruciale.

Il parco di alloggi disponibile risulta ampiamente insufficiente a soddisfare la domanda attuale (Federcasa, 2019). Ciò induce gli Enti gestori ad utilizzarlo nel modo più efficiente possibile, attraverso un’intensa attività di manutenzione e retrofit, non disponendo di risorse economiche sufficienti per espandere significativamente lo stock con nuovi edifici.

Tuttavia, la larga maggioranza degli alloggi ha un fabbisogno energetico medio superiore a 150 kWh/m<sup>2</sup>a, quindi non solo impattano in modo significativo sul bilancio ambientale del costruito, ma contribuiscono ad aggravare la condizione economica di utenti già fragili (ENEA, 2016; Aranda *et al.*, 2017). Ciò rende urgente avviare una massiccia campagna di riqualificazione energetica del patrimonio abitativo sociale, per la quale si registra vasto consenso, ma una cronica carenza di risorse affidate ai gestori per provvedervi. Inoltre, una conoscenza quasi sempre lacunosa dello stato del vasto patrimonio amministrato da ciascuna Azienda Casa rende particolarmente complessa e incerta la definizione delle priorità degli interventi (Melis, 2010; Sirombo *et al.*, 2017; Tzortzopoulos *et al.*, 2019).

In questo quadro, il Dipartimento di Architettura dell’Uni-

of the mission funding, to be coupled with the massive effort on renewable energy that also deals with energy supply for constructions.

The so-called *Superbonus* certainly represents a booster to this end, consisting in a tax deduction of 110% of the expenses for energy retrofit, including installation of photovoltaic systems and energy storage in buildings (D.L. 34/2020). According to ENEA, on May, 31 2022, 172,450 retrofits were ongoing in Italy (ENEA, 2022), 15% of which was undertaken in multi-family buildings where several procedural issues have emerged, mainly dealing with administrative and decisional processes, limiting the speed and the quality of the stock renovation.

Several methods, algorithms and software are available in the market to support the simulation and assessment of retrofit actions on building

performance, but their application is often time consuming and not convenient for building owners, especially for those managing large assets. The massive call for energy retrofit would instead benefit from predictive speedy tools to support decision-making at a large scale, such as in the social housing stock, aiming at targeting the investments to the more promising interventions (Dall’O’ *et al.*, 2020; Housing Europe, 2021).

*Energy transition in social housing*  
 Italian Social Housing (SH), which consists of about 900,000 dwellings that account for approximately 3.8% of the national residential stock (Censis, 2008), is a complex asset to manage, where energy consumption is a relevant issue. Because it is largely insufficient to meet the current demand (Federcasa, 2019), SH manag-

versità di Bologna e ACER Bologna (gestore del patrimonio di edilizia sociale di Bologna) hanno avviato una collaborazione per sviluppare soluzioni innovative per l’efficientamento energetico di patrimoni immobiliari complessi, quale quello gestito da ACER. Con il progetto InSPiRE (*Integrated technologies for Smart buildings and PREdictive maintenance*) finanziato nell’ambito del POR FESR 2014-2020 è stato messo a punto uno strumento predittivo di rapida applicazione, con cui valutare e confrontare i livelli prestazionali conseguibili con diverse azioni di retrofitting, in relazione alle caratteristiche dell’edificio, ai costi e ai tempi di intervento. Ciò per consentire ai gestori di pianificare efficacemente l’impiego delle proprie risorse, fisiche ed economiche. La metodica sviluppata è un sistema di supporto alle decisioni che rende disponibile al soggetto responsabile un set di dati e informazioni sistematizzate e comparabili sul parco amministrato, arricchite da indicatori di efficacia e impatto.

#### **Metodologia**

Lo studio si articola nelle seguenti fasi:

- I. Sviluppo di un metodo speditivo per ottenere informazioni affidabili sulla prestazione energetica degli edifici del parco amministrato da ACER Bologna.
- II. Selezione di scenari di retrofitting alternativi basati sulle modalità di intervento adottate più ricorrentemente in passato e definizione di una procedura per integrare gli scenari nel metodo speditivo di ricognizione delle prestazioni degli edifici del parco, in modo da consentire il confronto fra strategie alternative e la valutazione predittiva di tempi, costi e benefici in termini di efficienza energetica conseguibile.

ers are driven to handle their assets as efficiently as possible by making dwellings fully useable through intensive maintenance and retrofit, without having enough resources to launch the construction of new buildings to significantly expand the stock.

Most of the existing asset demand over 150 kWh/m<sup>2</sup>y, thus highly contributing to worsen the environmental burden as well as the economic status of already vulnerable users in the specific case of SH (ENEA, 2016; Aranda *et al.*, 2017). This requires a massive energy renovation campaign of the social housing stock, which meets with extensive consensus, but there is a persistent shortage of resources devoted to the purpose. In addition, a general lack of knowledge about the asset status makes prioritisation of interventions particularly challenging (Melis, 2010; Sirombo *et al.*, 2017; Tzortzopoulos *et al.*, 2019).

Within this general framework, the Department of Architecture of the University of Bologna and ACER Bologna (Social Housing Agency of Bologna) started a cooperation to explore the application of innovative solutions for energy efficiency of complex stock like the one managed by ACER. InSPiRE project (*Integrated technologies for Smart buildings and PREdictive maintenance*), funded under the umbrella of POR FESR 2014-2020, developed a predictive tool capable of considering and comparing the performance levels that possible retrofitting actions can reach, depending on building features, intervention costs and timing, and resource availability. This is aimed to allow managers to effectively plan the use of financial, economic and material resources. The developed methodology is a system designed to support the decision-making process by providing

### III. Monitoraggio e valutazione critica degli effetti degli interventi, comprese osservazioni sugli impatti legati al comportamento dell'utente.

La prima fase mira a colmare le lacune informative sullo stato del patrimonio, che in genere consiste in migliaia di abitazioni diverse per caratteristiche, tempi di costruzione e livelli di conservazione, delle quali i gestori dispongono di dati eterogenei, spesso incompleti, quasi sempre inadeguati a determinare le prestazioni di ciascuna unità, rendendo così impossibile un confronto, quindi anche l'assegnazione di priorità e la conseguente pianificazione degli interventi.

Per superare questo ostacolo, si è deciso di procedere con due modalità diverse. La prima si applica quando è disponibile il certificato di prestazione energetica, da cui vengono ricavati i dati necessari a determinare il profilo dell'alloggio. Gli alloggi privi di certificazione vengono invece trattati secondo una diversa modalità, risultando improponibile procedere con il calcolo analitico, la cui esecuzione è inconciliabile con i vincoli di tempi e risorse a cui le Aziende Casa devono sottostare (Vodola *et al.*, 2022).

Per questi alloggi sono state definite e testate due metodiche speditive, con cui è possibile ottenere rapidamente dati omogenei su vasti parchi edilizi.

La prima metodica speditiva (opzione a) è totalmente parametrica e consiste nell'assegnare a ciascun alloggio un profilo di prestazione energetica in relazione alla sua appartenenza ad una classe tipologica tramite Tabula (Tabula WebTool, online). La seconda metodica (opzione b) prevede la stima del profilo di prestazione energetica dell'alloggio tramite un set minimo di dati relativi alle sue dimensioni e caratteristiche costruttive.

data sets and organised comparable information concerning the managed stock, with the addition of impact and effectiveness indicators to be used as benchmark levels obtained by actions previously implemented across the same stock.

#### Methodology

The study is divided into the following phases:

- i. Development of a time-saving method to collect reliable data regarding the energy performance level of building stock managed by ACER.
- ii. Selection of alternative retrofitting scenarios, based on those most frequently adopted in the past, and definition of a procedure to integrate the identified scenarios into a time-saving mapping process of the building stock performance

to allow a comparative approach among alternative strategies and the predictive evaluation of time, costs and benefits in terms of achievable energy efficiency.

- iii. Monitoring and critical evaluation of the effects of interventions, including observations on impact related to user behavior

The first phase aims at filling the knowledge gap often faced by SH managers on their stock, which usually consists of thousands of dwellings differing in features, construction time, and conservation levels. SH agencies have indeed heterogeneous and inadequate data about the status of their assets. This makes it difficult to compare their baseline performance, assign priorities, and plan interventions accordingly.

To overcome this obstacle, it was decided to proceed in two different ways.

L'opzione a) fa ricorso a Tabula, uno strumento terzo di riconosciuta autorevolezza, accessibile online, che permette di assegnare la classe di prestazione energetica a un edificio residenziale in funzione dei consumi medi di edifici simili per tipologia, ubicazione e periodo di costruzione. Questa scelta è particolarmente utile quando dell'edificio sono disponibili negli archivi del Gestore solo i dati catastali, situazione che caratterizza una rilevante quota del parco.

L'opzione b) è invece una procedura intermedia, da utilizzare quando il soggetto gestore dispone già o può recuperare rapidamente alcuni dati essenziali sulle caratteristiche dell'immobile, che possono essere elaborati per stimarne il fabbisogno energetico tramite un calcolo semplificato. Il set di dati minimo comprende volume dell'edificio, superficie e trasmittanza termica media degli elementi di involucro.

Questa opzione permette di ridurre l'approssimazione inevitabilmente maggiore in cui si incorre utilizzando l'opzione a), ma risulta praticabile solo in un limitato numero di casi, a causa delle ampie lacune che si registrano nella documentazione disponibile relativa al parco.

La seconda fase dello studio mira a fornire ai gestori una procedura per confrontare diverse opzioni di retrofit attuabili, ciascuna associata ai relativi indici di costo dell'intervento e agli effetti attesi sulla domanda energetica dell'edificio, in relazione al suo stato attuale, come determinato dalle valutazioni della Fase 1. A questo fine, basandosi sulle azioni più frequentemente attuate in passato dal Gestore, è stato individuato un set di interventi ricorrenti, ai quali sono stati associati indicatori di impatto energetico ed economico che possono essere applicati parametricamente a un edificio o a un gruppo di fabbricati. Gli inter-

The first approach is applied when the energy performance certificate [EPC] is available to extract the necessary data, which are used to define the dwelling's profile. The units without EPC are processed in a different way as the analytical calculation is totally unfeasible due to time and resource constraints, which typically affect the Housing Companies, in addition to the need for very detailed input data that would burden the process further (Vodola *et al.*, 2022).

The proposed study offers two alternatives: one based on Tabula (option a) and the other on a Minimum Dataset (option b).

Option a) consists in accessing a widely used and recognised third party tool, such as Tabula (Tabula WebTool, online) that assigns energy performance class based on parametric data, according to the average consumption

of buildings grouped per typology, location and construction period. This choice is preferable when only cadastral data are available, not requiring the operator to possess specific knowledge.

Option b) is an intermediate procedure to be used when SH agencies already have or can quickly retrieve a data set that can be processed to estimate the energy demand according to a simplified calculation method. The minimum data set includes building volume, net floor area, envelope surface, envelope area to volume ratio, and average thermal transmittance of technical units. This option allows to reduce the approximation occurring when using option a), but it is feasible only in a limited number of cases, due to the large gaps that are recorded in the available documentation regarding the stock.

venti al momento selezionabili sono l'isolamento dell'involucro verticale opaco, l'isolamento della copertura e la sostituzione dei serramenti, ma altre opzioni possono essere facilmente aggiunte (Fig. 1). Per ciascuna, la metodica prevede la selezione di due livelli di prestazione incrementali: retrofit base e avanzato. Il primo consiste nell'applicazione di misure standard per il raggiungimento delle soglie minime da normativa (tipicamente il valore di trasmittanza di riferimento). Il secondo ipotizza il ricorso alla migliore tecnologia disponibile sul mercato con cui ottenere un miglioramento di almeno il 30% rispetto ai requisiti minimi di legge. Ad ogni intervento così definito è stato poi assegnato un costo parametrico standard (BPIE, 2010). Quindi lo strumento è stato completato con una funzione di utilità che confronta in modo iterativo diversi scenari e restituisce gli esiti attraverso una visualizzazione intuitiva, a beneficio dei gestori. La terza fase, ancora in corso, consiste nel monitoraggio degli effetti degli interventi di riqualificazione, effettuati a seguito dell'applicazione della procedura qui descritta, e nell'analisi dei *feedback* degli utenti finali.

Perciò, è stata avviata l'elaborazione dei dati forniti da sensori ambientali installati in un campione di alloggi, di diversi edifici e si è lanciata una campagna di sondaggi, mirata a indagare in modo specifico la percezione degli utenti degli alloggi. L'obiettivo delle due azioni parallele è quello di fornire riscontri incrociati sia sul livello di comfort percepito in relazione a quello rilevato strumentalmente, sia rispetto all'influenza del comportamento degli utenti sulle condizioni ambientali, che è una questione rilevante soprattutto nella prospettiva di raggiungere un elevato livello di risparmio energetico e di contrastare il rischio di povertà energetica in una popolazione a basso reddito.

The second phase of the study aims at providing SH managers with a procedure to compare different retrofit options, which vary by type of intervention, cost, and effect on the building energy demand. To this end, a set of recurring interventions, based on the actions most frequently implemented by the housing stock manager in the past, has been identified, to which energy and economic impact indicators have been associated to be applied parametrically to a building or a group of buildings. The basic available options are envelope insulation, roof insulation and replacement of windows and doors, but other options can be easily added to the set (Fig. 1). For each of them, two increasingly higher performance levels have been determined, namely basic and advanced refurbishment. The first consists in the application of standard measures to reach the

minimum regulation thresholds (typically U value). The second envisages the use of the best available technology to achieve higher energy performance, or at least a 30% improvement over the legal minimum requirements. Each intervention was assigned a standard cost (BPIE, 2010). Then the tool was completed with a part that iteratively compares several refurbishment scenarios and offers the SH manager user-friendly visualisations. The third phase, which is still in progress, consists in monitoring the effects of renovation actions and in analysing feedback from the end users. The third phase, which is still ongoing, consists in monitoring the effects of renovation actions, carried out following the application of the proposed procedure, and in analysing feedback from the end users. Hence, the processing of data provided by en-

Attualmente è in corso la fase di raccolta dei dati strumentali e si sta concludendo la predisposizione del questionario. La prima prevede l'utilizzo di contatori e sensori intelligenti installati da ACER in alcuni alloggi, selezionati tra quelli recentemente riqualificati, dove vengono raccolti dati sulla qualità dell'aria interna (es. livelli di COV e CO<sub>2</sub>) e sul comfort termico, che saranno poi confrontati con i risultati del sondaggio, non appena disponibili.

Per quanto riguarda il questionario, invece, l'aspetto attualmente allo studio riguarda la scelta del mezzo più appropriato per incoraggiare una risposta più ampia e affidabile possibile da parte degli utenti. Sulla base delle precedenti esperienze del gruppo di ricerca (Gaspari *et al.*, 2021) il questionario propone riflessioni sui comportamenti in grado di influenzare positivamente o negativamente la domanda di energia dell'edificio. Quindi, oltre ai dati generali sugli intervistati, come età, genere, livello di alfabetizzazione, che aiutano a inquadrare meglio le risposte, vengono approfonditi temi specifici, tra cui: il livello di consapevolezza riguardo alle potenzialità che possono avere i comportamenti di incidere sulla domanda energetica dell'edificio; la capacità di interazione con i sistemi edilizi e i dispositivi di regolazione, la comprensione delle informazioni sul comfort termico e sulla qualità dell'aria; la disponibilità a modificare i propri comportamenti in cambio di bollette più basse e/o di benefici ambientali.

### Caso studio

Il protocollo sviluppato dalle prime fasi di ricerca è stato applicato a un caso di studio, con lo scopo di verificarne fattibilità ed efficacia e di correggerne eventuali difetti. Adottando un

vironmental sensors installed in some sample units of different buildings has commenced and a survey campaign has been launched, aimed at specifically investigating end user perception. The aim of these parallel actions is to provide a cross-check of both in terms of comfort perceived in relation to the one instrumentally measured, and with respect to the influence of user behaviour on environmental conditions, which is an important issue in the perspective of achieving a high level of energy savings and of tackling the risk of energy poverty of a highly exposed low-income population. This phase is currently ongoing with instrumental data collection and preparation of the questionnaire. In particular, the first is making use of smart meters and sensors installed by ACER in selected renovated dwellings, where data about indoor air quality (e.g. VOC and CO<sub>2</sub> levels) as well as on thermal comfort are being collected, and will be compared with feedback from end-users. Regarding the questionnaire, instead, it is under discussion how to design it and what is the most appropriate medium to deliver it effectively in order to encourage the widest possible response. Based on previous experiences of the research team (Gaspari *et al.*, 2021), reflections on the user capacity of positively or negatively shaping a building energy demand are being proposed. Beyond general data on respondents, such as age, gender, literacy level, which help to better frame the answers, specific topics will be investigated, including awareness level on environmental issues and contribution of users in the building energy demand; understanding and capacity of interacting with building systems and information on thermal comfort

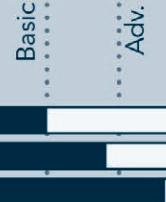
## CATEGORIES OF RETROFIT OPTIONS

### INTERVENTION SAVING TARGET kWh/m<sup>2</sup>y [%]

### PARAMETRIC COST [€/m<sup>2</sup>]

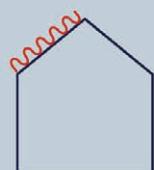
30% 60%

300 1200



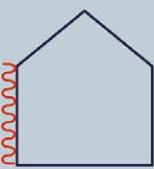
#### ROOF INSULATION

- Roof insulation type 1
- Roof insulation type 2
- Roof insulation type N



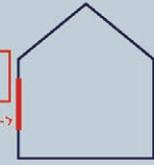
#### WALL INSULATION

- Wall insulation type 1
- Wall insulation type 2
- Wall insulation type N



#### WINDOWS REPLACEMENT

- Window type 1
- Window type 2
- Window type N



#### HEATING/COOLING SYSTEM UPGRADE



#### RENEWABLE ENERGY SOURCE INSTALLATION



#### SHADING SYSTEM APPLICATION



and air quality; willingness to change behaviour in favour of lower bills and/or environmental benefits.

#### Case study

The tool developed since the early stages was applied to a case study to test and adjust potential flaws. Therefore, assuming an iterative process of implementation and refinement, each phase was tested on a representative sample of buildings belonging to ACER Bologna.

First, the rapid method to calculate the building's current EP was implemented on 6 buildings, selected

among those provided with an EP certificate (for validation purposes) and representative of the whole stock per construction periods and conservation status. Their EP was then estimated by Tabula Webtool and compared with the one from EP certificate. The calculation of discrepancy between the two values completed the evaluation regarding the method's reliability and accuracy levels. As a result, errors were verified as acceptable for the purpose. The second phase of the procedure was then implemented. Figure 2 outlines a possible visualisation output for one of the above case

studies: basic facts and current energy performance of the building are reported in the upper part; details on different retrofits (i.e. basic and advanced scenarios) are provided below, allowing to easily compare their effects. Figure 2 shows the result of each scenario in terms of both energy saving and average cost of the intervention. Figure 3 shows the solution defined for the advanced retrofit scenario. At last, the effects of this intervention are being monitored through instrumental analysis, and will soon be integrated with the results of the surveys for building occupants.

#### Result and discussion

The result of the study is a digital tool allowing SH managers to quickly simulate and compare the effects of different retrofit interventions. In terms of output, the three methodological phases correspond to the three steps of the resulting digital tool, whose implementation workflow is outlined in figure 4. In the actual version, the tool allows to compare at least two alternatives for each of the three technical building element classes considered. Therefore, in few minutes the manager obtains at least 8 alternative intervention scenarios, which can be potential-

processo iterativo di implementazione e affinamento, ogni fase è stata testata su un campione rappresentativo di edifici appartenenti ad ACER Bologna. In primo luogo, è stato testato il metodo speditivo per calcolare l'indice di prestazione energetica di partenza di 6 fabbricati, selezionati tra quelli dotati di certificato EP (ai fini della validazione) e rappresentativi dell'intero stock per epoca di costruzione e stato di conservazione. Il loro EP è stato poi stimato tramite Tabula Webtool e confrontato con quello da certificato. Il calcolo della discrepanza tra i due valori ha completato la valutazione relativa all'affidabilità e al livello di accuratezza del metodo speditivo, i cui errori – inferiori all'11% – sono stati giudicati accettabili rispetto allo scopo. Quindi, si è proceduto applicando ai 6 edifici la Fase 2 della procedura.

La figura 2 illustra schematicamente la visualizzazione degli esiti di tale applicazione su uno degli edifici: nella parte superiore sono riportati i dati di base e la prestazione energetica attuale dell'edificio; in quella inferiore, i dettagli dei diversi interventi di retrofit (ovvero, scenari di base e avanzati) e il loro confronto. La figura 2 mostra i risultati di ciascuno scenario sia in termini di risparmio energetico sia di costi medi dell'intervento; la figura 3 la stratigrafia adottata nella soluzione di retrofit avanzato. Per valutare gli effetti di questo intervento, i dati delle analisi strumentali sono attualmente in corso di elaborazione e verranno integrati a breve con gli esiti dei questionari agli utenti.

## Risultati e discussione

Il risultato dello studio è uno strumento digitale che consente ai gestori di alloggi sociali di simulare e confrontare rapidamente gli effetti di diversi interventi di retrofit attuabili sul pro-

ly replicated for the 18,000 dwellings managed by the Agency. The easy output interface supports the evaluation of comparative scenarios on both the same building and a group of different buildings. Agencies can be thus supported by reliable and easy to retrieve facts for informed decision-making and to prioritise actions.

The implementation of the tool on 6 sample buildings proved that the errors in EP calculation deriving from the speedy method are acceptable as balanced by benefits in terms of time, cost and general effort saving for SH managers during the planning stage. Considering that the sample's average EP is around 180 kW/m<sup>2</sup>y, thus among the worst performing of the considered ACER stock, it was possible to simulate the relative effects that could be obtained by applying the different scenarios to the whole stock.

### *Limits and potentialities*

The study tried to overcome the limitations of the already available decision-making tools in this field by developing a simple but effective multi-criteria procedure. That is, a tool capable of considering several aspects of building sustainability at the same time, from environmental to financial aspects. The study tried to overcome the limits of the decision-making tools already available in this field by developing a simple but effective multi-criteria evaluation procedure, i.e. a tool capable of simultaneously considering aspects of environmental and economic sustainability. Although only a few recurring retrofits are implemented in this version of the tool, the open structure allows for easy additions and changes. For example, the future version could embed the assessments of the environ-

prio patrimonio. In termini di output, le tre fasi della metodologia corrispondono ai tre stadi a cui opera lo strumento digitale risultante, come rappresentato in figura 4.

Nella sua attuale configurazione, lo strumento permette di confrontare gli effetti di almeno due variabili progettuali per ciascuna delle tre classi di elementi tecnici considerate. In pochi minuti, quindi, il gestore è in grado di ottenere scenari alternativi pari ad almeno 8 combinazioni differenti di modalità di intervento, potendo estendere tali scenari predittivi anche a tutti i 18.000 alloggi amministrati da ACER Bologna, ovvero a sottoinsiemi di tale parco. L'interfaccia di output supporta la valutazione di scenari comparativi sia sullo stesso edificio, che su un gruppo di edifici diversi, rendendo così disponibili in breve tempo dati affidabili, sulla cui base prendere decisioni informate e dare priorità alle azioni.

L'implementazione dello strumento sui sei edifici campione ha dimostrato che gli errori di calcolo dell'EP derivanti dal metodo speditivo sono accettabili in valore e ampiamente compensati dal risparmio di tempo e costi altrimenti richiesti. Tenuto conto che la prestazione energetica degli edifici del campione si attesta su 180 kW/m<sup>2</sup>a, collocandoli fra quelli del parco con la prestazione energetica più scarsa, è stato possibile simulare gli effetti ponderati che si otterrebbero applicando all'intero parco i diversi scenari di intervento.

### *Limiti e potenzialità*

Lo studio ha cercato di superare i limiti degli strumenti decisionali già disponibili in questo campo, sviluppando una procedura di valutazione multicriteriale semplice ma efficace, ovvero uno strumento in grado di considerare contemporaneamente

mental effects of design choices (associating embodied energy and carbon footprint indicators), or even allow the simulation of user behavioural change as a result of awareness campaigns and feedback from smart meters and in-home integrated apps.

Actually, the tool allows to optimise asset management by exploiting the available resources and data regarding the building conditions, speeding up data retrieval and the comparative process, thus identifying the most effective renovation measures and buildings requiring the most urgent and prompt reactions.

Both during the circumstances of exceptional tax incentives, such as the Super bonus, and during the ordinary lack of resources, more effective planning is a crucial condition to prioritise actions and quantify them over a time-frame according to reliable criteria.

The tool operates considering the involved quantities to define and prioritise actions to be carried out in a more limited number, while optimising the limited resources in the hands of the housing companies.

### **Conclusions**

The primary goal of the study was to provide the Social Housing Companies with a timesaving but effective supporting tool to plan maintenance and retrofit actions on the wide and heterogeneous building stock they manage. The proposed methodology highlights the potential coming from organised decisional processes, thus the adoption of effective supporting tools. This becomes particularly important when public funding and resources are involved in addition to relevant social issues that require appropriate criteria to define the priorities while maximising

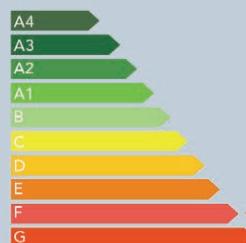
# BUILDING 1

## Via Albani - Via Dall'Arca, Bologna, ITA

### AS IS STATUS



Construction	1951
Floor area	725 m <sup>2</sup>
Volume	14758
Inhabitants	115 m <sup>3</sup>
Structure	bricks bearing wall



EP<sub>gl,nren</sub>  
211.55 kWh/m<sup>2</sup>y

### RETROFIT SCENARIOS

#### Analytic EP calculation [kWh/m<sup>2</sup>y]

Current	Deep refurbishment
211.55	31.9

#### Tabula WebTool EP estimate [kWh/m<sup>2</sup>y]

Current	Basic retrofit	Advanced retrofit
218.2	97.1	59.1

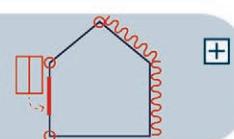
#### Option 1 Basic retrofit

Energy saving 32%  
Cost 2000 €/m<sup>2</sup>



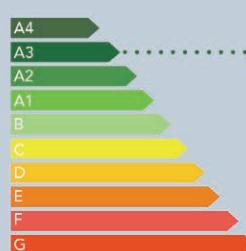
#### Option 2 Advanced retrofit

Energy saving 73%  
Cost 3200 €/m<sup>2</sup>



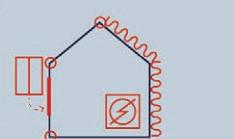
#### Option 3 Deep refurbishment

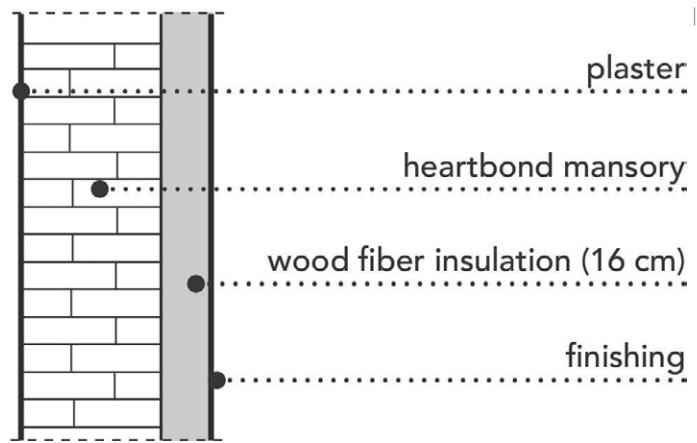
- Wall and roof thermal insulation
- Windows replacement
- Installation of photovoltaic panels
- Heating system replacement
- Cooling system passive integration



EP<sub>gl,nren</sub>  
31.9 kWh/m<sup>2</sup>y

Total saving  
11.938 kWh/y





aspetti di sostenibilità ambientale ed economica.

Sebbene in questa versione dello strumento siano implementati solo pochi interventi di retrofit ricorrenti, la struttura aperta consente facilmente integrazioni e modifiche. Ad esempio, la versione futura potrebbe incorporare valutazioni sugli effetti ambientali delle scelte progettuali (associando indicatori di *embodied energy* e *carbon footprint*), o consentendo anche la simulazione del cambiamento comportamentale degli utenti per effetto di campagne di sensibilizzazione e dei feedback dei contabilizzatori intelligenti e delle app di interazione integrate nelle abitazioni.

Tuttavia, già ora lo strumento permette di ottimizzare la gestione degli asset in base alle risorse disponibili e alle condizioni degli edifici, velocizzando il processo di reperimento e confronto dei dati, quindi l'individuazione delle misure di riqualificazione più efficaci e degli edifici che necessitano di interventi incisivi.

Sia in presenza di incentivi fiscali eccezionali, come il Super bonus, sia in circostanze ordinarie di carenza di risorse, una più efficace pianificazione è condizione indispensabile per prioritizzare gli interventi e dosarli nel tempo sulla base di criteri attendibili. Lo strumento agisce infatti sulla quantità per determinare e prioritizzare gli interventi, da effettuare in numero più limitato, quindi per ottimizzare le scarse risorse a disposizione delle Aziende Casa.

## Conclusioni

L'obiettivo primario dello studio era di fornire alle agenzie di edilizia sociale uno strumento di ausilio alla pianificazione rapida ma efficace di azioni di manutenzione e retrofit sui grandi

ed eterogenei asset che sono chiamate a gestire. La metodica sviluppata evidenzia le potenzialità di processi decisionali razionali per attuare la riqualificazione energetica del parco edificato; quindi, l'utilità di strumenti che li supportino efficacemente. Ciò in particolare quando siano in gioco risorse finanziarie e fisiche pubbliche e siano coinvolti rilevanti aspetti sociali, che richiedono di utilizzare criteri accurati per fissare le priorità e massimizzare i benefici ottenibili dagli interventi.

Nonostante sia rivolta prevalentemente all'housing sociale, la soluzione sviluppata è potenzialmente applicabile anche in altri segmenti del parco edilizio, soprattutto in considerazione della spinta alla riqualificazione energetica e delle problematiche procedurali evidenziate negli interventi su edifici plurifamiliari, che potrebbero essere almeno parzialmente alleviate attuando simulazioni predittive con metodiche speditive del tipo di quelle qui proposte.

Ulteriori potenziali benefici dello studio investono altri temi di attualità: il risparmio energetico e riduzione delle emissioni nel patrimonio edilizio e i loro conseguenti impatti ambientali positivi, a medio e lungo termine; la gestione ottimizzata delle risorse pubbliche; il miglioramento del comfort abitativo e la riduzione del rischio di povertà energetica per gli utenti. Rispetto

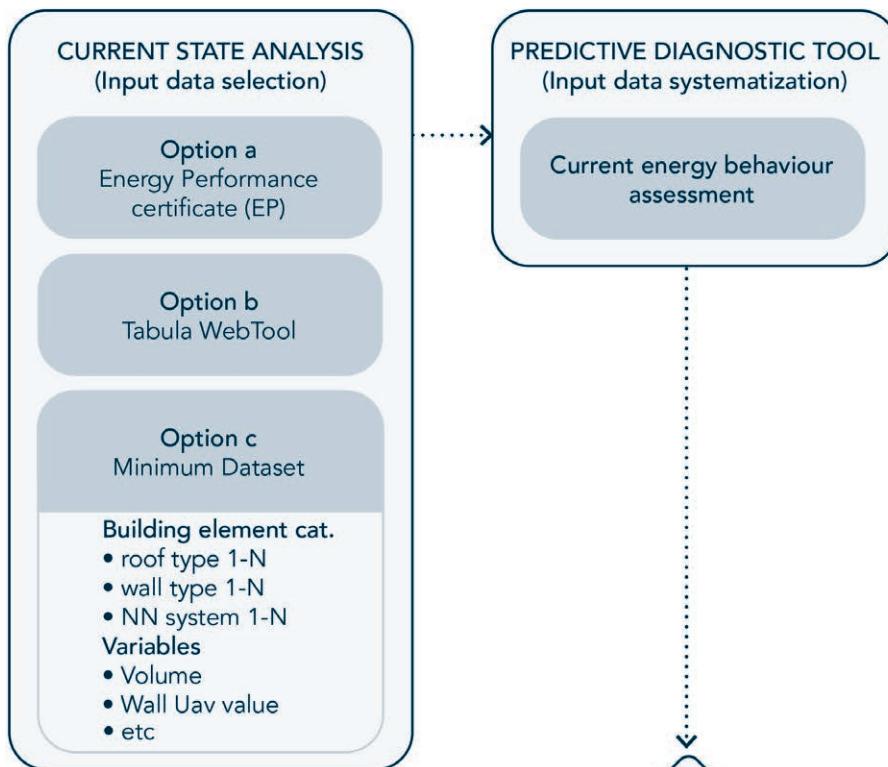
the potential benefits from the undertaken actions.

Although it is mainly intended to support social housing initiatives, the solution developed is potentially applicable to other segments of the building stock, particularly considering the energy efficiency driver and the procedural problems detected during interventions on multi-family buildings, which could be at least partially reduced by implementing predictive simulations based on timesaving methods such as the one presented.

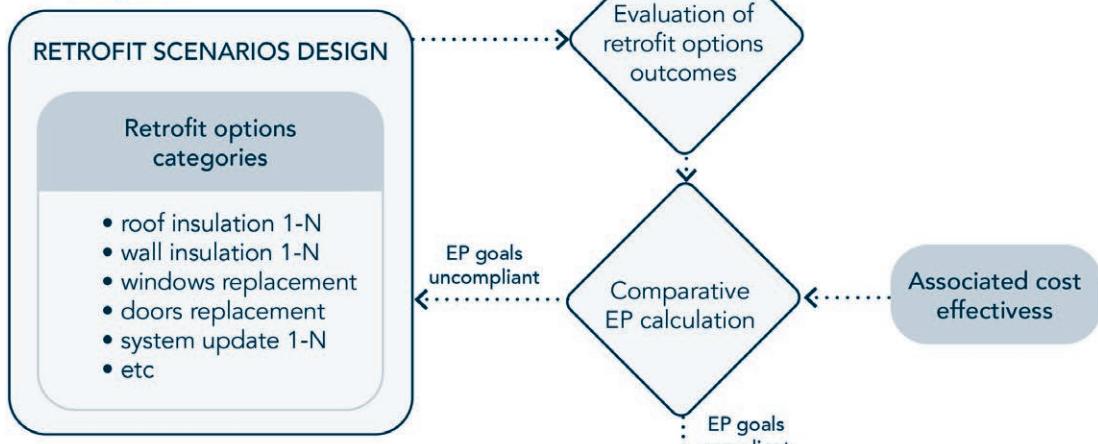
The study also addresses other important topics: the energy saving and carbon emission reduction of the built environment, and the subsequent positive environmental impact both in the medium and long terms; the optimised management of public finances; the improvement of user comfort and the reduction of energy poverty risk.

As concerns the latter, while the first research actions were focused on reducing issues deriving from technical aspects of the building – thus targeted at improving the energy performance of the stock – the ongoing phase aims at working on the share of energy demand that mostly depends on user behaviour. This will be achieved by raising their awareness and active response through information registered and made available via in-home digital tools.

## PHASE 1



## PHASE 2



## PHASE 3



a quest'ultimo tema e ai suoi molteplici risvolti, mentre le azioni considerate nella prima fase della ricerca hanno puntato alle criticità legate alla risposta tecnica dell'edificio – cioè a migliorare quanto più possibile le prestazioni energetiche del patrimonio ACER, la fase in corso di sviluppo mira a intervenire anche sulla componente di consumi dipendente dal comportamento dell'utente, rendendolo più consapevolmente attivo grazie alle informazioni registrate dai sensori, e rese disponibili tramite efficaci dispositivi di comunicazione digitale.

## REFERENCES

- Aranda, J., Zabalza, I., Conserva, A., Millán, G. (2017), "Analysis of energy efficiency measures and retrofitting solutions for social housing buildings in Spain as a way to mitigate energy poverty", *Sustainability*, Vol. 9, n.10, p. 1869.
- BPIE (2010), *Cost Optimality. Discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Buildings Directive*, available at: [https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/BPIE\\_costoptimality\\_publication2010.pdf](https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/BPIE_costoptimality_publication2010.pdf) (accessed 25 August 2022).
- Censis (2008), *Social Housing e agenzie pubbliche per la casa*, Dexia, Roma.
- Dall'O', G., Ferrari, S., Bruni, E., Bramonti, L. (2020), "Effective implementation of ISO 50001: A case study on energy management for heating load reduction for a social building stock in Northern Italy", *Energy and Buildings*, Vol. 219, p. 110029.
- Decreto Legislativo 34/2020 Decreto rilancio, available at: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/05/19/20G00052/sg> (accessed 22 August 2022).
- ENEA (2016), *Rapporto Annuale Efficienza energetica (RAEE) 2016*, available at: <https://www.efficienzaenergetica.enea.it/pubblicazioni/raee-rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica/rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica-2016.html> (accessed 24 July 2022).
- ENEA (2022), *Rapporto ENEA dati mensili Superbonus*, available at: [https://www.efficienzaenergetica.enea.it/images/detrazioni/Avvisi/Report\\_dati\\_mensili\\_31\\_05\\_22.pdf](https://www.efficienzaenergetica.enea.it/images/detrazioni/Avvisi/Report_dati_mensili_31_05_22.pdf) (accessed 08 August 2022).
- European Commission (2019), *The European Green Deal. COM(2019) 640 final*, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (accessed 28 August 2022).
- Federcasa (2019), *Federcasa e Federcostruzioni: in italia servono 300mila nuove case popolari*, available at: <https://www.federcasa.it/appello-di-feder-casa-e-federcostruzioni-in-italia-servono-300mila-nuove-case-popolari/> (accessed 20 August 2021).
- Gaspari, J., Antonini, E., Marchi, L., Vodola, V. (2021), "Energy transition at home: A survey on the data and practices that lead to a change in household energy behavior", *Sustainability*, Vol. 13, n.9, p. 5268.
- Housing Europe (2021), *The state of housing in Europe*, available at: <https://www.stateofhousing.eu> (accessed 28 August 2022).
- IEA (2021a), *Tracking Buildings 2021*, IEA, Paris.
- IEA (2021b), *World Energy Outlook 2021*, available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021> (accessed 28 August 2022).
- Levine, M. et al. (2007), "Residential and commercial buildings, Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", in Metz, B. et al. (Eds.), *Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. & New York, U.S.A., pp. 387-446.
- McKinsey & Company (2009), *Pathways to a Low-Carbon Economy. Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve*, available at: [https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/dotcom/client\\_service/sustainability/cost%20curve%20pdfs/pathways\\_lowcarbon\\_economy\\_version2.ashx](https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/dotcom/client_service/sustainability/cost%20curve%20pdfs/pathways_lowcarbon_economy_version2.ashx) (accessed 28 August 2022).
- Melis, P. (2010), *La valutazione della qualità globale degli edifici residenziali nella programmazione degli interventi di riqualificazione alla scala del patrimonio edilizio*. Tesi di dottorato, Ingegneria Edile, Ciclo XXIII, Università degli Studi di Cagliari.
- Presidenza del Consiglio dei Ministri (2021), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*, available at: <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf> (accessed 22 August 2022).
- Sirombo, E., Filippi, M., Catalano, A., Sica, A. (2017), "Building monitoring system in a large social housing intervention in Northern Italy", *Energy Procedia*, Vol. 140, pp. 386-397.
- Tabula WebTool, available at: <https://webtool.building-typology.eu/#bm> (accessed 20 March 2021).
- Tzortzopoulos, P., Ma, L., Soliman Junior, J., Koskela, L. (2019), "Evaluating social housing retrofit options to support clients' decision Making-SIM-PLER BIM protocol", *Sustainability*, Vol.11, n.9, p. 2507.
- Vodola, V., Antonini, E., Gaspari, J., Marchi, L. (2022), "A Methodology for Fast Simulation of Energy Retrofitting Scenarios of Social Building Stock", in Littlewood, J. R., Howlett, R. J., and Jain, L. C. (Eds.), *Sustainability in Energy and Buildings 2021*, Springer, Singapore, pp. 147-157.

Niccolò Casiddu<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5010-038X>

Claudia Porfirione<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1270-2523>

Annappola Vacanti<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7992-8623>

<sup>1</sup> Dipartimento Architettura e Design (DAD), Università di Genova, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Culture del Progetto, Università Iuav di Venezia, Italia

[casiddu@unige.it](mailto:casiddu@unige.it)

[claudia.porfirione@unige.it](mailto:claudia.porfirione@unige.it)

[avacanti@iuav.it](mailto:avacanti@iuav.it)

**Abstract.** L'articolo descrive la messa a punto di Living Hub: un laboratorio per ricerca, sperimentazione e formazione basato sul modello Living Lab, integrato con l'impiego della tecnica della Simulazione, per l'ottimizzazione dello studio dell'interazione tra persone, ambienti e tecnologia. Il laboratorio ha l'obiettivo di supportare la progettazione di tecnologie capacitanti e ambienti responsivi in grado di adattarsi alle necessità dei propri utenti, con riferimento al contesto domestico. Collocandosi in Liguria, regione col più alto tasso di invecchiamento al mondo, Living Hub focalizza la sperimentazione su modelli assistenziali innovativi per la cura del fragile, attraverso diversi livelli di integrazione scalare/modulare delle tecnologie abilitanti nel costruito.

**Parole chiave:** Tecnologie Capacitanti; User Experience; Living Lab; Simulazione Avanzata; Human Technology Interaction.

## Contesto

L'evoluzione di prodotti, ambienti e servizi tecnologici rappresenta un fenomeno globale che sta trasformando la nostra quotidianità, con conseguenze ancora da approfondire. Assistiamo a un impiego pervasivo e acritico di tecnologie che hanno trasformato il modo in cui definiamo noi stessi; individuare la strada migliore per svilupparle dal punto di vista sociale e ambientale richiede di comprenderne più a fondo le implicazioni (Floridi, 2022). Progettare ambienti intelligenti significa creare interazione, symbiosi e cooperazione, tanto con le persone, quanto con sistemi smart (Giaccardi and Redstrom, 2020). Abbiamo bisogno di tecnologie "capacitanti": volontarie, amichevoli, cooperative, in grado di inserirsi senza disturbo negli spazi di vita umani (Norman, 2008). Esse possono incrementare le prestazioni del patrimonio edilizio in termini di recupero e valorizzazione per creare spazi abitativi adattivi, tarati sulle esigenze specifiche di un'utenza diversificata. Un impiego "capaci-

tante" e non abilitante (ovvero collaborativo e non autonomo) prevede che si utilizzi la Tecnologia solo quando necessario, con modalità di interazione naturale. Tale prospettiva apre a scenari e sfide complessi per la realizzazione di ambienti di vita adattivi, attraverso diversi livelli di integrazione scalare/modulare delle tecnologie nel costruito. Pensando ad ambienti e prodotti come a una protesi, in grado di abilitare capacità e azioni degli utenti, è necessario mettere a punto soluzioni integrate che si sovrappongono alla stregua di livelli di progettazione interconnessi (Spadolini, 2020).

## *Ageing in Place*

Il settore delle Tecnologie Assistive sta ottenendo sempre più rilevanza a livello globale, dal momento che esse possono svolgere un ruolo determinante nell'affrontare la sfida di mantenere i sistemi sanitari e sociali di alta qualità ed economicamente accessibili. Le AT sono un potente strumento per consentire alle persone diversamente abili di vivere a casa in autonomia, e molte soluzioni sono volte a favorire l'invecchiamento attivo presso il proprio domicilio, secondo il paradigma dell'*Ageing in place* (Wiles *et al.*, 2012): a esse si attribuisce il potenziale di riconoscere gli anziani come risorsa e abilitarne il ruolo attivo nella comunità. Ma la tecnologia stessa può trasformarsi in una barriera all'inclusione dei fragili nella società e in una costosa complicazione per un sistema sanitario già complesso. Come assicurarsi, dunque, che le AT siano sviluppate e implementate in modo che il loro potenziale sia sfruttato adeguatamente? L'area metropolitana di Genova rappresenta un caso studio

## Capacitating technologies for adaptive environments: the Living Hub case study

**Abstract.** The paper describes the development of Living Hub: a laboratory for research, experimentation and training based on the Living Lab model, integrated with the use of the Simulation technique, to optimise the study of the interaction between people, environments, and technology. The lab aims to support the design of capacitating technologies and responsive environments that can adapt to the needs of their users, with reference to the home context. Located in Liguria, a region with the highest rate of ageing in the world, Living Hub focuses experimentation on innovative models for the care of the frail through different levels of scalar/modular integration of enabling technologies in the built environment.

**Keywords:** Capacitating Technologies; User Experience; Living Lab; Advanced Simulation; Human Technology Interaction.

## Context

The evolution of technological products, environments, and services is a global phenomenon that is transforming our daily lives, with consequences that have yet to be fully explored. We are witnessing a pervasive and uncritical use of technologies that have transformed the way we define ourselves. To identify the best way forward in developing them both socially and environmentally, it is necessary to understand their implications more deeply (Floridi, 2022). Designing smart environments means creating interaction, symbiosis and cooperation, both with people and with smart systems (Giaccardi and Redstrom, 2020). We need "capacitating" technologies: voluntary, friendly and cooperative, able to fit seamlessly into human living spaces (Norman, 2008). They can enhance the performance of the built heritage

in terms of rehabilitation to create adaptive living spaces calibrated to the specific needs of diverse users. A conscious approach aimed at "capacitating" rather than enabling uses (i.e. collaborative rather than autonomous) involves using Technology only when necessary, in ways of interaction that feel natural. Such perspective opens up complex scenarios and challenges for the design of adaptive living environments through different levels of scalar/modular integration of technologies in the built environment. Thinking of environments and products as a prosthesis, capable of enabling user capabilities and actions, it is necessary to devise integrated solutions that overlap in the manner of interconnected levels of design (Spadolini, 2020).

## *Ageing in Place*

The field of Assistive Technologies is gaining increasing global relevance

significativo: è uno dei contesti territoriali tra i più anziani d'Europa, dove il 28,4% della popolazione è over 65 (EuroSTAT, 2019). Un aumento dell'insicurezza legata ai limiti fisici o cognitivi connessi all'invecchiamento, una scarsa propensione alla vita attiva, l'isolamento sociale e la percezione "ostile" degli ambienti domestici e urbani, concorrono ad alimentare negli anziani la sensazione di solitudine. Inoltre, la carenza di strutture/servizi sociali inclusivi nelle aree periferiche urbane aumenta il rischio di sviluppare disturbi depressivi (Santaera *et al.*, 2017). Per contrastare questo fenomeno occorre definire il corretto ruolo e impiego delle tecnologie, basandosi su principi di co-progettazione utili a promuovere forme innovative di gestione dello spazio privato e urbano.

L'Unione Europea (2019) ha identificato Genova e la regione Liguria come sito di riferimento della European Innovation Partnership on Active and Healthy Ageing (EIP on AHA), a riconoscimento delle strategie adottate nella formulazione di innovazioni idonee all'invecchiamento della popolazione. In tal senso, le soluzioni proposte rappresentano, ad esempio, l'elemento strumentale per mappare i bisogni degli utenti e i livelli di erogazione dei servizi esistenti, al fine di integrare reti di servizi per l'inclusione e la partecipazione attiva dei fragili, e favorire forme user-friendly di accesso digitale, applicate a spazi indoor e outdoor, nonché a scenari di integrazione e partecipazione intergenerazionale e multiculturale.

L'individuazione di questi temi si integra con gli interventi relativi alla Missione 6 "Salute" (M6) del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza approvato dal Governo italiano nell'agosto 2021. La Componente C1 si orienta verso il tema della casa come primo luogo di cura all'interno della comunità e, in questi

since they can play a crucial role in addressing the challenge of ensuring high quality and affordable health and social systems. ATs are a powerful tool for enabling people with disabilities to autonomously live at home, and many solutions are aimed at fostering active ageing at home, following the Ageing in Place paradigm (Wiles *et al.*, 2012). They are credited with the potential to recognise older people as a resource and enable their active role in the community. But technology itself can turn into a barrier to the inclusion of frail people in society, and a costly complication for an already complex healthcare system. How, then, to make sure that ATs are developed and implemented so that their potential is adequately exploited?

The Genoa metropolitan area is a significant case study. It is one of the oldest territorial contexts in Europe,

where 28.4 percent of the population is over 65 (EuroSTAT, 2019). An increase in insecurity related to the physical or cognitive limitations associated with ageing, a low propensity for active living, social isolation, and the "hostile" perception of home and urban environments, all contribute to the feeling of loneliness in elderly users. In addition, the lack of inclusive social facilities/services in urban peripheral areas increases the risk of developing depressive disorders (Santaera, Severdo and Costabile, 2017). To counter this phenomenon, it is necessary to define the correct role and use of technologies, based on principles of co-design, capable of promoting innovative forms of management of private and urban space.

The European Union (2019) has identified Genoa and the Liguria region as the reference site of the European In-

termini, la disciplina del progetto rivolge la propria attenzione alla produzione di reti di sistemi intelligenti per l'analisi dei parametri fisiologici, funzionali e comportamentali utili alla valutazione clinica del fragile, alla riabilitazione, all'inclusione sociale, al networking con i servizi di vicinato e alla sicurezza. Il fine ultimo di tali sistemi è validare un modello di assistenza completo e personalizzato, poco invasivo e altamente integrato all'interno dell'ambiente domestico.

## Metodologia

La progettazione della tecnologia richiede un approccio versatile in grado di cogliere "l'inaspettato": è patrimonio comune dei designer di esperienze la consapevolezza che, a prescindere dalla progettazione più approfondita, gli utenti svilupperanno comportamenti inattesi, basati sulla massima ottimizzazione del processo (Norman, 2008). Considerando l'estrema complessità e pervasività dei sistemi contemporanei, comprendere cosa spinge le persone verso una soluzione piuttosto che un'altra e come tali decisioni – spesso inconsce – siano da imputarsi alla qualità dell'esperienza offerta permette di realizzare tecnologie più competitive e prodotti, servizi e ambienti efficaci (Zerwas and Von Kortzfleisch, 2011). Indagare queste tematiche richiede l'inserimento delle interazioni uomo – tecnologia all'interno di un contesto di vita quotidiana (in contrasto con l'ambiente asettico di un laboratorio) e l'impostazione fortemente iterativa del processo (Ståhlbröst and Bergvall-Kåreborn, 2008).

## Living Lab

I suddetti requisiti sono compatibili con il concetto di Living Laboratory (LL). Il termine è stato coniato presso il Massa-

novation Partnership on Active and Healthy Ageing (EIP on AHA), in recognition of the strategies adopted in developing innovations suitable for the ageing population. In this sense, the solutions proposed by technologies can be, for example, instrumental in mapping the needs of users and the levels of existing service delivery, to integrate networks of services for the inclusion and active participation of the frail, and to foster user-friendly forms of digital access, applied to both indoor and outdoor spaces, as well as to intergenerational and multi-cultural integration and participation scenarios.

The identification of such themes integrates with interventions related to Mission 6 "Health" (M6) of the National Recovery and Resilience Plan approved by the Italian government in August 2021. Component C1 is ori-

ented toward the theme of housing as the first place of care within the community. In these terms, the project's discipline turns its attention to the production of networks of intelligent systems for the analysis of physiological, functional, and behavioural parameters useful for clinical assessment of the frail, rehabilitation, social inclusion, networking with neighbourhood services and security. The goal of such systems is to validate a model of comprehensive and personalised care that is minimally invasive and highly integrated within the home environment.

## Methodology

The design of technology requires a versatile approach capable of capturing "the unexpected". It is a common understanding among UX designers that, no matter how good the design is, users will develop unexpected behav-

chusetts Institute of Technology (MIT), dove è stata istituita la prima struttura di questo tipo: un laboratorio in cui utenti volontari avrebbero vissuto in un ambiente domestico, osservati mentre compivano le loro attività quotidiane (Intille *et al.*, 2005).

La Commissione Europea – che inserisce l'approccio Living Lab nello European R&D and Innovation System – lo definisce combinazione di successo tra ambienti collaborativi basati su tecnologie IT, piattaforme di open innovation, metodi user centred di sviluppo di prodotti/servizi e partnership pubbliche e private (EU, 2009). I LL sono organizzazioni guidate dalla pratica, che facilitano e promuovono processi di innovazione aperta e collaborativa, attraverso ambienti in cui artefatti/sistemi possono essere studiati e sperimentati insieme agli utenti per sviluppare nuove soluzioni funzionali; operano come intermediari tra cittadini, organizzazioni di ricerca, aziende e regioni, per la creazione congiunta di valore, la prototipazione rapida e la validazione sperimentale e hanno modelli di implementazione multipli a seconda del contesto in cui operano.

L'osservazione delle tecnologie in uso fornisce una visione attendibile di ciò che gli utenti fanno, invece di affidarsi su quello che essi dicono di fare; infatti, le persone tendono a fare affermazioni differenti dalle proprie azioni, e riscontrano difficoltà a esprimere in modo chiaro i propri bisogni (Nielsen, 2016). Gli utenti sono coinvolti nel ruolo di co-creatori al pari degli esperti (designer, ricercatori, stakeholder) attraverso ricerca in situ incentrata sul valutare l'uso reale di un artefatto o di un ambiente; in questo contesto, gli utenti sono considerati gli "esperti" della propria esperienza. L'approccio LL inserisce il processo di ricerca *in the wild*, e mira a ottenere "intuizioni locali" che possano

hours based on maximum process optimisation (Norman, 2008). Considering the extreme complexity and pervasiveness of contemporary systems, understanding what drives people toward one solution over another and how such – often unconscious – decisions are attributable to the quality of the experience ultimately allows for more competitive technologies and effective products, services, and environments (Zerwas and Von Kortzfleisch, 2011). Investigating these issues requires placing human-technology interactions within a context of everyday life (as opposed to the aseptic environment of a laboratory) and a highly iterative setting of the process (Ståhlbröst and Bergvall-Kåreborn, 2008).

#### *Living Lab*

The above requirements are compatible with the concept of Living Lab-

atory (LL). The term was coined at the Massachusetts Institute of Technology (MIT), where the first facility was established: a laboratory in which volunteer users would live in a home environment, observed while performing their daily activities (Intille *et al.*, 2005).

The European Commission – which includes the Living Lab approach in the European R&D and Innovation System – defines it as a successful combination of IT-based collaborative environments, open innovation platforms, user-centred methods of product/service development, and public and private partnerships (EU, 2009). LLs are practice-driven organisations that facilitate and promote open and collaborative innovation processes, through real-life environments where artefacts/systems can be studied and tested together with users to develop

descrivere e svelare particolarità di un determinato gruppo di utenti o appartenere a uno specifico contesto di vita quotidiana (Fulgencio *et al.*, 2012).

Accanto alla funzione di ricerca, i Living Lab si pongono come attivatori di processi di *empowerment* degli utenti nei confronti della tecnologia, migliorando l'alfabetizzazione digitale e incoraggiando la crescita locale. Questa agenda di responsabilizzazione si lega alla nozione di innovazione sociale: l'obiettivo va oltre l'innovazione di processo o di prodotto, mirando al miglioramento della società ottenuto dando una voce a bisogni inascoltati e creando nuove relazioni sociali (Traina, 2016).

#### **Simulazione**

Alcune caratteristiche dei LL sono coerenti con le attività condotte nei Centri di Simulazione. In questi laboratori, la tecnica della simulazione permette di sostituire o amplificare esperienze reali evocando o replicando aspetti sostanziali del mondo reale in modo interattivo (Gaba, 2004). Tale tecnica ha una storia consolidata, a partire dai primi impieghi in campo militare fino all'utilizzo in campo educativo; è molto utilizzata soprattutto nelle scienze dure e applicate (Siri *et al.*, 2017). Si definisce simulazione una rappresentazione interattiva della realtà che utilizza un modello in grado di replicare un sistema del quale si vuole comprendere il funzionamento (Gaba, ibidem). Si tratta di un'imitazione, attiva e non statica, di un sistema reale o desiderato. Le simulazioni possono avere un livello più o meno alto di fedeltà alla realtà e richiedere un intervento più o meno massiccio di strumenti tecnologici e/o attori in grado di replicare situazioni interazionali. Tale approccio non è di norma appannaggio di professionisti e ricercatori che operano

new functional solutions. They operate as intermediaries between citizens, research organisations, companies and regions for joint value creation, rapid prototyping and experimental validation; and, while they have many commonalities, they have multiple implementation models depending on the context in which they operate.

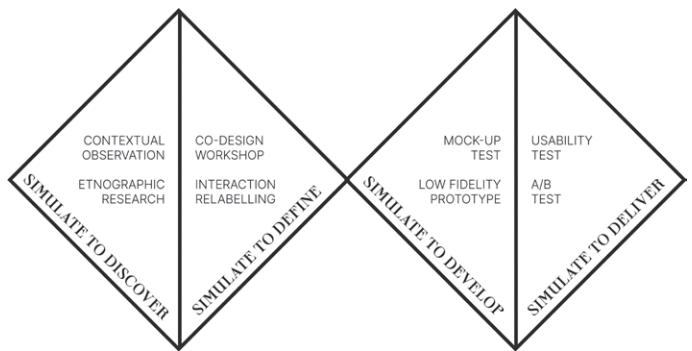
Observing technologies in use provides a more realistic view of what users do, instead of relying on what they say they do. In fact, people have a tendency to make claims that differ from their actions, and find it difficult to express their needs clearly (Nielsen, 2016). Users are engaged in the role of co-creators as equals with experts (designers, researchers, stakeholders) through in situ research focused on evaluating the actual use of an artefact or environment. In this context, users are considered the "experts" of their

own experience. The LL approach inserts the research process into the wild and aims to obtain "local insights" that can describe and reveal details of a specific user group, or belong to a specific context of daily life (Fulgencio *et al.*, 2012).

Alongside the research function, Living Labs pose as activators of user empowerment processes toward technology, improving digital literacy and encouraging local growth. This empowerment agenda ties in with the notion of social innovation: the goal goes beyond process or product innovation, aiming at the improvement of society achieved by voicing unheard needs and creating new social relationships (Traina, 2016).

#### **Simulation**

Some characteristics of LLs are consistent with the activities conducted in



nel mondo del progetto. Malgrado ciò, si può discutere che la simulazione rappresenti un valore aggiunto per lo studio dell’interazione uomo - tecnologia, grazie alla capacità di stimolare i processi cognitivi dei partecipanti e ristrutturare modelli mentali consolidati (De Jong, 2006).

#### Potenziale informativo

I vantaggi di condurre ricerca in simulazione sono molteplici: le limitazioni pratiche a condurre studi strutturati e prolungati in contesti reali possono essere superate riproducendo questi ultimi in maniera realistica in un laboratorio; inoltre, è possibile simulare ambienti diversi da quelli a cui i partecipanti sono abituati. Riassumendo il processo progettuale secondo il modello Double Diamond (Banathy, 1996), le tecniche della simulazione si pongono a supporto delle attività di ciascuna fase, aumentandone valore ed efficacia (Fig.1).

Nella fase esplorativa, la simulazione viene utilizzata per condurre ricerche etnografiche e osservazioni approfondite delle azioni degli utenti, raccogliendo dati quantitativi e qualitativi tramite sensori di movimento e riprese audio/video; è possibile riprodurre con precisione il contesto di vita degli utenti, analizzandone le specificità.

Nella fase di definizione del concept, un ambiente simulato funge da luogo di incontro tra utenti e progettisti che, attraverso attività partecipative e di co-design, condividono proposte e soluzioni fino alla produzione di un numero ristretto di proposte. Anche in questo caso, la pianificazione di tali attività all’interno di un contesto simulato facilita il processo, elevando le capacità creative dei progettisti e, soprattutto, degli utenti; trovandosi a interagire all’interno di un ambiente realistico, piuttosto

che in un luogo asettico, anche le persone inesperte in materia progettuale sono in grado di dare voce alle proprie opinioni e proporre suggestioni mirate.

Nella fase di sviluppo, è possibile testare rapidamente mock-up e prototipi a bassa fedeltà favorendo il processo di sospensione dell’incrédibilité nell’utente, portandolo a percepire la situazione come reale e accelerando il processo di perfezionamento ed eliminazione dei difetti di usabilità dei concept.

Infine, i prototipi ad alta fedeltà possono essere testati in modo preciso in situazioni simulate, registrando l’attività e osservando se l’interazione tra utenti e innovazione proposta è stata positiva. Questa fase può essere iterata diverse volte fino alla produzione dell’artefatto definitivo. Anche in seguito allo sviluppo della proposta progettuale, è possibile utilizzare la simulazione per valutare nel tempo l’accettabilità del progetto.

#### Living Hub

Living Hub è un’iniziativa dell’Università di Genova, nata

da un accordo tra il Dipartimento Architettura e Design (DAD) e il Centro di Simulazione e Formazione Avanzata dell’Ateneo genovese (SimAv); quest’ultima struttura è finalizzata alla gestione di servizi e attività che fanno uso delle tecniche e tecnologie della simulazione, tra cui: macro-simulazione, micro-simulazione, simulazione relazionale (Siri *et al.*, 2017). Costituito nel 2016, SimAv ha inizialmente focalizzato la propria opera

Simulation Centres. In these laboratories, the simulation technique makes it possible to replace or even amplify real experiences by evoking or replicating substantial aspects of the real world in an interactive way (Gaba, 2004). This technique has a well established history, starting from its earliest uses in the military to its use in education. It is widely considered a valid knowledge tool especially in the field of hard and applied sciences (Siri *et al.*, 2017). Simulation is defined as an interactive representation of reality that uses a model capable of replicating a system, whose operation must be understood (Gaba, *ibidem*). It is an active and not static imitation of a real or desired system. Simulations may have a higher or lower level of fidelity to reality and require the intervention of technological tools and/or actors capable of replicating interactional situations. Such an

approach is not usually a prerogative of practitioners and researchers working in the project world. Despite this, it can be argued that simulation can represent an added value for the study of human-technology interaction due to its ability to stimulate participants’ cognitive processes and restructure established mental models (De Jong, 2006).

#### Informational potential

The advantages of conducting research in simulation are manifold. Practical limitations to conducting structured and prolonged studies in actual contexts can be overcome by realistically reproducing the latter in a laboratory; in addition, environments other than those to which participants are accustomed can be simulated.

Summarising the design process according to the Double Diamond model (Banathy, 1996), simulation

techniques are used to support the activities of each phase, increasing their value and effectiveness (Fig. 1).

In the exploratory phase, simulation is used to conduct ethnographic research and in-depth observations of users’ actions, collecting quantitative and qualitative data through motion sensors and audio/video footage. The living context of users can be accurately reproduced by analysing their specifics. In the concept definition phase, a simulated environment serves as a meeting place between users and designers who, through participatory and co-design activities, share proposals and solutions until a small number of proposals are produced. Again, planning such activities within a simulated context facilitates the process, elevating the creative abilities of designers and, more importantly, of users, who find themselves interacting within a

realistic environment, rather than in an asetic place. Even people inexperienced in design can voice their opinions and propose targeted suggestions.

In the development phase, low fidelity mock-ups and prototypes can be tested quickly, fostering the process of suspension of disbelief in users, leading them to perceiving the situation as real, and making the process of refining and eliminating usability flaws in the concepts faster.

Finally, high fidelity prototypes can be tested precisely in simulated situations by recording the activity and observing whether the interaction between users and the proposed innovation was positive. This phase can be iterated several times until the final artefact is produced. Even following the development of the design proposal, simulation can be used to evaluate the acceptability of the design over time.

sulla formazione di studenti e professionisti del settore sanitario, per poi espandere il raggio d'azione ad altri ambiti. Oggi rappresenta un luogo di incontro interdisciplinare, avendo coinvolto diverse Scuole dell'Ateneo e facendo uso di tecnologie come realtà aumentata e mista, prototipazione 3D, sensoristica per il monitoraggio. Gli obiettivi delle attività di ricerca ricadono nell'ambito della cura e del benessere della persona, in ottica di inclusività e accessibilità.

#### *Obiettivi e finalità*

Living Hub è un aggregatore di progettisti, utenti e stakeholder, con l'obiettivo di diventare una piattaforma di incontro tra persone e tecnologie, tra soggetti organici e soggetti artificiali. Considerata la natura multidisciplinare del progetto, le sue finalità sono molteplici. Dal punto di vista della formazione, Living Hub si propone di utilizzare la simulazione per:

- supportare la formazione specifica sui temi dell'accessibilità e dell'inclusione per studenti e professionisti delle discipline del progetto, con focus particolare sull'ambiente domestico e le sue sfide;
- fornire ai cittadini una piattaforma d'incontro con soluzioni tecnologiche innovative e apprendere come sfruttarle per aumentare la qualità della propria vita quotidiana, mediante attività collaborative con progettisti e corsi di formazione;
- supportare lo sviluppo di competenze di caregiver in contesto domiciliare da parte di medici, infermieri e soggetti non professionali.

Dal punto di vista della ricerca, Living Hub si propone di supportare attività di ricercatori e progettisti per:

- comprendere le problematiche e le necessità degli utenti in

#### **Living Hub**

Living Hub is an initiative of the University of Genoa, originating from an agreement between the Department of Architecture and Design (DAD) and the Center for Simulation and Advanced Training of the University of Genoa (SimAv); the latter facility manages services and activities that make use of simulation techniques and technologies, including macro-simulation, micro-simulation, and relational simulation (Siri *et al.*, 2017). Established in 2016, SimAv initially focused its work on training students and professionals in the healthcare sector, and then expanded its reach to other fields. Today it is an interdisciplinary meeting place, having involved several Schools of the Genoese University and making use of technologies such as augmented and mixed reality, 3D prototyping, and sensor technology for monitoring. The

goals of research activities fall in the area of personal care and well-being, with a view to inclusiveness and accessibility.

#### *Goals and Objectives*

Living Hub is an aggregator for designers, users, and stakeholders, with the goal of becoming a meeting platform for people and technologies, organic and artificial subjects. Given the multidisciplinary nature of the project, its goals are multiple. From an educational perspective, Living Hub aims to use simulation to:

- support specific training on accessibility and inclusion issues for students and professionals in the design disciplines, with special focus on the home environment and its challenges;
- provide a platform for citizens to encounter innovative technological

ambito domestico, tramite osservazione diretta delle loro attività all'interno dell'ambiente simulato;

- organizzare attività partecipative per la coprogettazione, in modo da coinvolgere gli utenti in tutte le fasi del processo progettuale e generare soluzioni innovative per problemi specifici e ben definiti;
- valutare la funzionalità e il livello di interazione di artefatti esistenti e prototipi in fase di sviluppo all'interno del contesto domestico in cui vengono/verranno fructi;
- strutturare una banca dati relativa alle abitudini e le modalità di interazione con la tecnologia in ambiente domestico;
- realizzare ambienti di vita adattivi attraverso diversi livelli di integrazione scalare/modulare delle tecnologie nel costruito.

#### *Spazio*

Fisicamente, Living Hub occupa 74 mq e si presenta come fedele riproduzione di un appartamento (Fig. 2). Lo spazio è attrezzato con quattro tralicci all'americana paralleli che sorreggono camere da presa, microfoni e luci dimmerabili (Fig. 3). L'impianto viene gestito dalla sala di controllo adiacente al laboratorio, da cui controllare il flusso di dati audio/video, insieme ai dati generati dai sensori di movimento posti lungo le pareti (Fig. 4). Questo insieme di informazioni rappresenta l'output quantitativo, che può essere messo a sistema con le informazioni qualitative ottenute dall'osservazione diretta e dall'interazione con i partecipanti.

Lo spazio è articolato in sei ambienti principali:

- ingresso;
- cucina;

solutions and learn how to leverage them to increase the quality of their daily lives through collaborative activities with designers and training courses;

- support the development of caregiver skills in the home setting by physicians, nurses and non-professionals.
- From a research perspective, Living Hub aims to support activities of researchers and designers to:
- understand the problems and needs of users in the home environment through direct observation of their activities within the simulated environment;
- organise participatory co-design activities to involve users in all stages of the design process and generate innovative solutions for specific, well-defined problems;
- assess the functionality and level

of interaction of existing artefacts and prototypes under development within the home context in which they are/will be used;

- structure a database related to the habits and patterns of interaction with technology in the home environment;
- create adaptive living environments through different levels of scalar/modular integration of technologies in the built environment.

#### *Space*

Physically, Living Hub occupies 74 square metres and looks like a lifelike reproduction of an apartment (Fig. 2). The space is equipped with four parallel trusses that support cameras, microphones and dimmable lights (Fig. 3). The system is operated from the control room adjacent to the lab, from which the flow of audio/video data can

- area living (Fig. 5);
- studio;
- camera da letto (Fig. 6);
- bagno con doccia e vasca.

Nonostante sia completamente funzionante, esistono alcune limitazioni tecniche al realismo dell'allestimento, assimilabile a quello di una scenografia da set cinematografico. Infatti, i tralicci all'americana rappresentano un limite, poiché non si possono installare tramezze né inserire lampadari. L'illuminazione è gestita attraverso le luci affisse ai tralicci, completamente personalizzabili per calore e intensità. Allo stesso modo, non sono state previste pavimentazioni particolari, ma una copertura omogenea di colore nero, per ottimizzare la qualità delle riprese. Questa limitazione è comunque funzionale a rendere lo spazio estremamente versatile a seconda delle necessità: gli interventi strutturali sono stati ridotti al minimo, inserendo nell'*open space* una sola parete interna, quella dell'angolo doccia. Le diverse stanze sono allestite sfruttando alcuni armadi e scaffalature che dividono fisicamente gli ambienti funzionali, e possono essere spostati con relativa rapidità ed efficienza per creare scenari differenti. Le americane sono disposte in maniera strategica per facilitare la ripresa delle attività nei diversi ambienti, attraverso la movimentazione delle videocamere.

### Attività

Ogni sperimentazione condotta presso Living Hub richiede una attenta pianificazione, volta a ottenere risultati rilevanti in termini di dati utili alla ricerca. A monte vengono definiti gli obiettivi, distinguibili in:

be controlled, along with data generated by motion sensors placed along the walls (Fig. 4). This set of information is the quantitative output, which can be mixed with the qualitative information obtained from direct observation and interaction with participants.

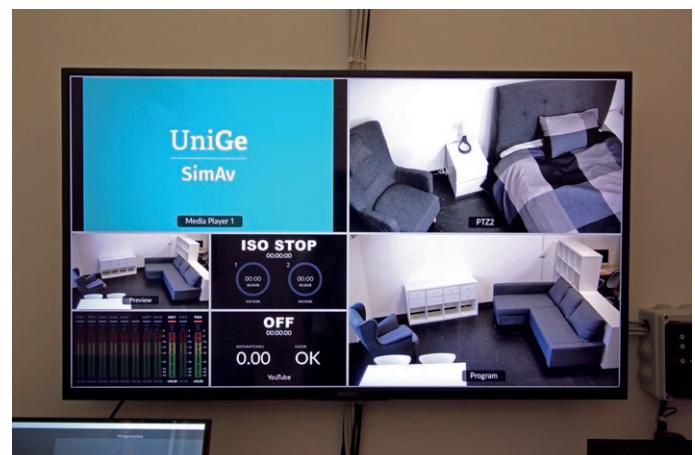
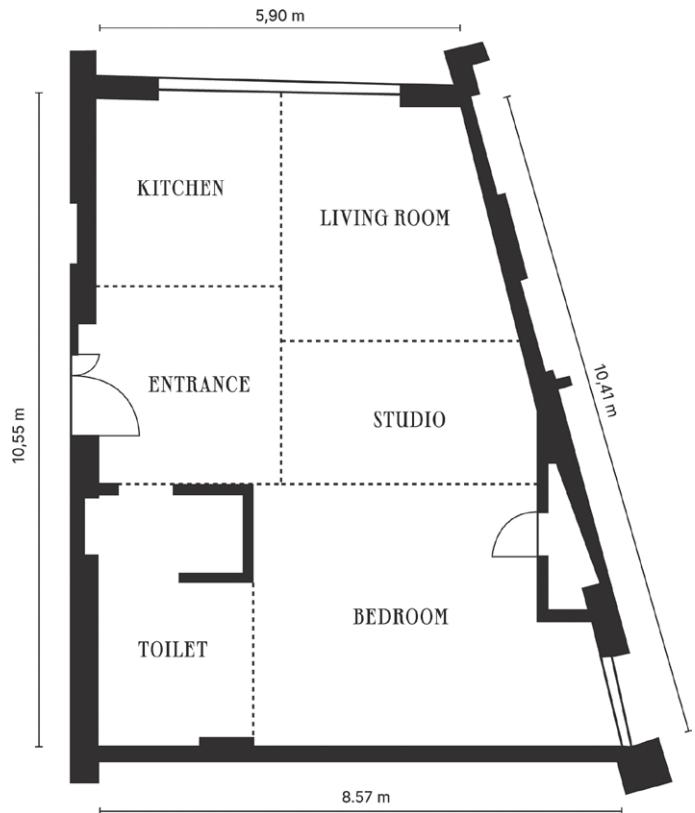
The space is divided into six main rooms:

- entrance hall;
  - kitchen;
  - living area (Fig. 5);
  - study;
  - bedroom (Fig. 6);
  - bathroom with shower and bathtub.
- Despite being fully functional, there are some technical limitations to the realism of the layout, which can be assimilated to that of a movie set design. In fact, the trusses are a limitation, as partitions cannot be installed, or chandeliers inserted. Lighting is managed through lights affixed to the

trusses, which are fully customisable for warmth and intensity. Similarly, no special flooring is provided, but a homogeneous black covering to optimise the quality of the shots. However, this limitation is functional to make the space extremely versatile as needed. Indeed, structural interventions have been reduced to a minimum, inserting in the open space only one internal wall, that of the shower corner. The different rooms are set up by taking advantage of some cabinets and shelving that physically divide the functional rooms, and which can be moved relatively quickly and efficiently to create different scenarios. The trusses have been strategically arranged to facilitate the filming of activities in the different rooms through the movement of cameras.

### Activities

Any experimentation conducted



- cognitivi: fanno leva sulle conoscenze del partecipante e ne stimolano la creatività;
- affettivi: sviluppano l'empatia del designer in modo che possa comprendere gli utenti;
- psicomotori: verificano e sviluppano gesti pratici, permettendo di valutare l'usabilità degli artefatti.

L'ottenimento degli obiettivi è strettamente legato alle condizioni definite per lo svolgimento dell'attività. Esse forniscono un'indicazione di quali materiali e strumenti devono essere utilizzati (ad esempio, *kit* per *co-design* o prototipi e *mock-up* da testare).

Lo scopo di una simulazione non è ricostruire un contesto completamente reale, ma creare un senso di realtà in grado di determinare l'efficacia dell'attività. A questo fine, va definito un grado di fedeltà:

- fisica, legata alle caratteristiche dell'ambiente e dei materiali;
- concettuale, legata alla sequenza logica di avvenimenti che si susseguono durante l'attività;
- emozionale, correlata alle emozioni suscite nei partecipanti.

In seguito, è necessario stilare uno storyboard che descriva la trama delle azioni che verranno compiute (Fig.7). Ciò permette di definire i ruoli degli utenti coinvolti e di eventuali attori con cui i primi dovranno interagire.

A questo punto, si introduce il concetto di distrattore: si tratta di un elemento legato in modo indiretto o tangente alla situazione simulata che ha l'obiettivo di aumentare la complessità del caso. I distrattori possono essere persone, oggetti o condizioni ambientali. Nella simulazione clinica si è soliti mettere in guardia riguardo all'utilizzo di troppi distrattori, perché questi

within the Living Hub requires careful planning, aimed at obtaining relevant results in terms of data useful for research. Objectives are defined upstream and can be distinguished into:

- cognitive: they leverage the participant's knowledge and stimulate their creativity;
- affective: they develop the designer's empathy so that he or she can understand the users;
- psychomotor: they test and develop practical gestures, allowing the usability of artefacts to be evaluated.

The achievement of the objectives is closely related to the conditions defined for carrying out the activity. They provide an indication of what materials and tools are to be used (e.g. co-design kits or prototypes and mock-ups for testing).

The purpose of a simulation is not to reconstruct a completely real context,

but to create a sense of reality that can determine the effectiveness of the activity. To this end, a degree of fidelity must be defined:

- physical, related to the characteristics of the environment and materials;
- conceptual, related to the logical sequence of events that occur during the activity;
- emotional, related to the emotions aroused in the participants.

Next, it is necessary to draw up a storyboard describing the plot of the actions that will be performed (Fig. 7). This makes it possible to define the roles of the users involved and any actors with whom the former will have to interact. At this point, the concept of a distractor is introduced. This is an element indirectly or tangentially related to the simulated situation that is intended to increase the complexity of the case.



| 05



| 06

Distractors can be people, objects, or environmental conditions. In clinical simulation, it is a common practice to warn about using too many distractors, because these would make the cognitive load too large for the learner, whose working memory would become overloaded, thus reducing the quality of learning (Ingrassia *et al.*, 2019). Regarding experimentation with users, precisely this condition of forced cognitive overload could, instead, prove useful in revealing issues in the use of an artefact or prototype that were not taken into account during design. The distractor can be used as a tool to obtain context-aware data. Finally, it is necessary to define the sought type of data and the tools needed to collect them. This requires the preparation of questionnaires or interviews, and the proper arrangement of sensors, cameras, and microphones (Fig. 8).

## Conclusions

Living Hub supports the design of capacitating home solutions by studying the interaction between technology and users, generating knowledge about their daily living activities to:

- describe how they are performed, what factors influence them, what subjects and objects are involved;
- explain why they are performed, what is the desired and actual effect on people's needs;
- evaluate the perceived outcome and measurable impact;
- imagine better ways of conducting the same activities.

In summary, by contextualising different research methods within a realistic scenario, the potential of the simulation technique is exploited to:

- stimulate participants' creativity by fostering collaboration among users, designers and stakeholders;

07 | Un momento di sperimentazione con occhiali che simulano ipovedenza grave, credits: I. Nevoso

*A moment of experimentation with glasses simulating severe low vision, credits: I. Nevoso*

08 | Una sperimentazione sull'ipovedenza grave registrata attraverso le telecamere fisse, credits: I. Nevoso

*An experimentation on low vision recorded with stationary cameras, credits: I. Nevoso*

renderebbero il carico cognitivo troppo ampio per il discente, la cui memoria di lavoro si andrebbe a sovraccaricare riducendo la qualità dell'apprendimento (Ingrassia *et al.*, 2019). Per quello che riguarda la sperimentazione con utenti, proprio questa condizione di sovraccarico cognitivo forzato potrebbe rivelarsi utile a svelare problematiche nell'uso di un artefatto o un prototipo che non sono state tenute in considerazione durante la progettazione. Il distrattore può essere utilizzato come strumento per ottenere dati che tengono conto del contesto.

Infine, è necessario definire il tipo di dati ricercati e gli strumenti necessari per raccoglierli. Questo richiede la preparazione di questionari o interviste, e la corretta predisposizione di sensori, videocamere e microfoni (Fig.8).

07 |



## Conclusioni

Living Hub supporta il progetto di soluzioni domestiche capacitanti attraverso lo studio dell'interazione tra tecnologia e utenti, generando conoscenza sulle attività di vita quotidiana di questi ultimi, al fine di:

- descrivere come vengono svolte, quali fattori le influenzano, quali soggetti e oggetti sono coinvolti;
- spiegare perché vengono svolte, qual è l'effetto desiderato ed effettivo sulle necessità delle persone;
- valutare il risultato percepito e l'impatto misurabile;
- immaginare modi migliori di condurre le medesime attività.

In sintesi, contestualizzando differenti metodi di ricerca all'interno di uno scenario realistico, viene sfruttato il potenziale della tecnica simulatoria per:

- stimolare la creatività dei partecipanti favorendo la collaborazione tra utenti, progettisti e stakeholder;
- migliorare la qualità e il valore dei dati qualitativi e quantitativi raccolti attraverso uno scambio di feedback diretto ed efficace tra soggetti coinvolti nelle sperimentazioni.

Future pubblicazioni presenteranno i risultati delle attività condotte presso il laboratorio, e una valutazione empirica dell'impatto della tecnica simulatoria sulla progettazione tecnologica.

## ATTRIBUZIONI

Il contributo è il risultato di una comune riflessione degli Autori. Nonostante ciò, il paragrafo 'Metodologia' è da attribuire a N. Casiddu, i paragrafi 'Contesto' e 'Conclusioni' e il sottoparagrafo 'Obiettivi e finalità' sono da attribuire a C. Porfirione, il paragrafo 'Simulazione' e i sottoparagrafi 'Spazio' e 'Attività' sono da attribuire ad A. Vacanti.

| 08



## REFERENCES

- Banathy, B.H. (1996), *Designing social systems in a changing world*, New York: Plenum Press (Contemporary systems thinking).
- De Jong, T. (2006), Technological advances in inquiry learning, *Science*, Vol. 312, n. 5773, 532-533.
- European Commission (2009), "Living Labs for user-driven open innovation – an overview of the Living Labs methodology, activities and achievements", available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3f36ebab-4aaaf-4cb0-aada-fe315a935eed>.
- Floridi, L. (2022), *Etica dell'intelligenza artificiale: Sviluppi, opportunità, sfide*, Raffaello Cortina Editore.
- Fulgencio, H., Le Fever, H., Katzy, B. (2012), "Living Lab: Innovation through Pastiche", *Proceedings of the eChallenges e-2012 Conference*, Lisbon: IMC (pp. 1-8).
- Gaba, D.M. (2004), "The future vision of simulation in health care", available at [https://qualitysafety.bmjjournals.com/content/13/suppl\\_1/i2](https://qualitysafety.bmjjournals.com/content/13/suppl_1/i2).
- Giaccardi, E., Redstrom, J. (2020), "Technology and more-than-human design", *Design Issues*, Vol. 36, n. 4, pp. 33-44.
- Ingrassia, P., Carenzo, L. and Santalucia, P. (2019), *La simulazione ad alta fedeltà in ambito sanitario: Guida pratica e casi clinici*, FrancoAngeli.
- Intille, S.S. and Larson, K. (2005), "Designing and evaluating home-based, justintime supportive technology", *Studies in Health Technology and Informatics*, Vol. 118, pp. 79-88.
- Knowles, M.S. (1968), "Andragogy, not pedagogy", *Adult leadership*, Vol. 16, n. 10, pp. 350-352.
- Nielsen, J. (2016), "The distribution of users' computer skills: Worse than you think", available at <https://www.nngroup.com/articles/computer-skill-levels/>.
- Norman, D.A. (2008), *Il design del futuro*, Apogeo saggi.
- Piano nazionale di ripresa e resilienza – PNRR, M6 "Salute", available at: <https://www.agenas.gov.it/pnrr/missione-6-salute>.
- Santaera P, Severdio R., Costabile A. (2017), "Anziani e depressione: il ruolo della solitudine", *Psicogeratria*, Vol. 3, AIP.
- Siri, A., Chirico, M., Torre, G. (2017), *Nuovo centro di ateneo per la simulazione: nuove opportunità di formazione e di ricerca interdisciplinare e interprofessionale*, EmemItalia 2017, Bolzano.
- Spadolini, M.B., (2020), *One size design. Un metodo per il progetto*, Letteraventidue.
- Ståhlbröst, A. and Bergvall-Kåreborn, B. (2008), "FormIT: An approach to user involvement".
- Traina, I. (2016), "Implementing a Service of Independent Living Using a Participatory Approach" *Open Access Library Journal*, Vol. 3, n. 4, pp. 1-10.
- Wiles J., Leibing A., Guberman N., Reeve J. and Allen R. (2012), "The meaning of ageing in place to older people", *Gerontologist*, Vol. 52, n. 3, pp. 357-366.
- Zerwas, D. and von Kortzfleisch, H.F. (2011), "Potentials of living labs for the diffusion of information technology: a conceptual analysis", *IFIP International Working Conference on Governance and Sustainability in Information Systems-Managing the Transfer and Diffusion of IT*, Springer, Berlin, Heidelberg.

- improve the quality and value of the qualitative and quantitative data collected, through direct and effective feedback exchange between actors involved in the experiments.

Future publications will present the results of the activities conducted at the lab, and an empirical evaluation of the impact of the simulation technique on technological design.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The paper is the result of a common reflection of the Authors. Notwithstanding, the paragraph 'Methodology' is by N. Casiddu, the paragraphs 'Context' and 'Conclusions' and the subsection 'Goals and Objectives' are by C. Porfirione, the paragraph 'Simulation' and the subsections 'Space' and 'Activities' are by A. Vacanti.

# Il progetto 4CH e le tecnologie abilitanti nella salvaguardia del Patrimonio Culturale

RICERCA E  
Sperimentazione/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION

Andrea Boeri, <https://orcid.org/0000-0003-1390-2030>

Serena Orlandi, <https://orcid.org/0000-0003-0868-3080>

Rossella Roversi, <https://orcid.org/0000-0002-6192-3437>

Beatrice Turillazzi, <https://orcid.org/0000-0001-5864-2055>

Dipartimento di Architettura, Università di Bologna, Italia

andrea.boeri@unibo.it

serena.orlandi4@unibo.it

rossella.roversi@unibo.it

beatrice.turillazzi@unibo.it

**Abstract.** L'uso delle tecnologie digitali rappresenta un campo di indagine e sperimentazione aperto e in rapidissima evoluzione. Il presente contributo affronta il loro ruolo nelle attività di salvaguardia del Patrimonio Culturale (PC), attingendo ai risultati di ricerca del progetto H2020 "4CH-Competence Centre for the Conservation of Cultural Heritage" (CC) [GA 101004468]. 4CH muove dalla visione *human-centric* della trasformazione digitale auspicata dall'UE e prevede un approccio interdisciplinare, che combina saperi teorici e pratici, il tutto a supporto di una riflessione sul ruolo delle tecnologie abilitanti, sulle nuove competenze loro associate, sui relativi approcci alla conservazione e valorizzazione del PC e sulla loro integrazione nella cultura tecnica consolidata.

**Parole chiave:** Competence Centre; Salvaguardia delle risorse culturali; Digitalizzazione; Tecnologie abilitanti; Patrimonio Culturale.

## Introduzione

La trasformazione digitale nel settore della salvaguardia e valorizzazione del Patrimonio Culturale (PC), intesa sia come processo volto alla creazione di entità e basi di dati, sia come risultato dell'applicazione di specifiche tecnologie, può rappresentare un fattore chiave per rispondere in maniera olistica, collaborativa e integrata alle esigenze, in costante mutazione, mosse dalle sfide globali che impattano sui beni culturali e naturali, vista la loro fragilità e limitata capacità adattiva (Europeana, 2020; Barbuti and De Bari, 2020).

Il positivo e innovativo supporto fornito dalla digitalizzazione è riconosciuto in molteplici ambiti che includono, ad esempio, le attività di amministrazione, gestione e manutenzione, il monitoraggio attivo del degrado ambientale e la valutazione dei rischi connessi, la ricostruzione dei beni danneggiati o andati distrutti, e la conservazione della memoria (Danesh and Rajabi, 2022).

## The 4CH project and enabling technologies for safeguarding the Cultural Heritage

**Abstract.** The use of digital technologies is an open and very rapidly evolving field of investigation and experimentation. This paper addresses their role in Cultural Heritage (CH) safeguarding activities, drawing on the research results of the H2020 project "4CH-Competence Centre for the Conservation of Cultural Heritage" (CC) [GA 101004468]. 4CH moves from the human-centric vision of digital transformation, advocated by the EU, and envisages an interdisciplinary approach, combining theoretical and practical knowledge, all in support of a reflection on the role of enabling technologies, the new skills associated with them, the CH preservation and enhancement related approaches, and their integration into the established technical culture.

**Keywords:** Competence Centre; Safeguarding cultural resources; Digitisation; Enabling technologies; Cultural Heritage.

Tra le tecnologie in più rapida e significativa evoluzione, la digitalizzazione 3D, l'*Information and Communication Technology* (ICT), *Augmented Reality* (AV) e *Virtual Reality* (VR), consentono forme efficaci di visualizzazione, ma soprattutto abilitano l'integrazione tra dati spaziali e altre informazioni, storiche e/o dinamiche, generando così nuovi contenuti. Applicazioni che aprono alla creazione di servizi a supporto di musealizzazione, turismo e educazione, favorendo un approccio più accessibile nella forma stessa di esperire cultura e PC, offrendo un terreno di cooperazione tra i diversi attori coinvolti, quali, istituzioni, operatori economici, ricercatori, cittadini, studenti, visitatori e turisti (Bonancini, 2011; Di Giulio *et al.*, 2019).

La digitalizzazione del PC rappresenta una sfida aperta, riconosciuta e affrontata a livello europeo attraverso programmi di finanziamento, politiche di indirizzo e azioni mirate alla sperimentazione delle tecnologie digitali più innovative nel settore culturale e creativo.

Infrastrutture di ricerca con un particolare focus sul PC – come, ad esempio, DARIAH (<https://www.dariah.eu/>), CLARIN (<https://www.clarin.eu/>) o E-RISH (<http://www.e-rihs.eu/>) – hanno contribuito all'accesso e alla conoscenza di strumenti e servizi digitali, mentre numerosi progetti Europei hanno riportato un impatto significativo in termini di implementazione di applicazioni, linee guida, protocolli, modelli e piattaforme – come ad esempio ARIADNEplus (<https://ariadne-infrastruture.eu/>), 3D-ICONS (<http://3dicons-project.eu/>) o Europeana (<https://www.europeana.eu/it>), per citarne solo alcuni.

## Introduction

The digital transformation in the sector of safeguarding and enhancing Cultural Heritage (CH), intended both as a process aimed at the creation of entities and databases, and as a result of the application of specific technologies, can be a key factor to respond in a holistic, collaborative and integrated way to the constantly changing needs moved by the global challenges that impact on cultural and natural heritage, given their fragility and limited adaptive capacity (Europeana, 2020; Barbuti and De Bari, 2020).

The positive and innovative support provided by digitisation is recognised in many areas including, for example, administration, management and maintenance, active monitoring of environmental degradation and risk assessment, the reconstruction of damaged or destroyed CH assets, and the preser-

vation of memory (Danesh and Rajabi, 2022). Among the most rapidly and significantly evolving technologies, 3D digitisation, Information and Communication Technology (ICT), Augmented Reality (AV) and Virtual Reality (VR) allow effective forms of visualisation but, above all, they enable integration between spatial data and other historical and/or dynamic information, thus generating new content. Applications that open up to the creation of services supporting musealisation, tourism and education, encouraging a more accessible approach to experiencing culture and CH, offering a terrain of cooperation between the different actors involved, such as, institutions, economic operators, researchers, citizens, students, visitors and tourists (Bonancini, 2011; Di Giulio *et al.*, 2019).

The digitisation of CH is an open challenge, recognised and addressed at

Il valore riconosciuto alle tecnologie e alle competenze digitali avanzate nell'economia e nella società emerge dagli obiettivi del programma di finanziamento "Digital Europe (DIGITAL)" - sviluppato nella cornice del più generale "DIGITAL Europe Work Programme 2021-2022" (EP and the Council of the European Union, 2021). Il progetto prevede la creazione di un comune *data space* europeo che include il PC tra gli ambiti di interesse individuati: una piattaforma aperta che sosterrà la trasformazione digitale, promuovendo l'accessibilità di set di dati di alto valore, la creazione e il riutilizzo di contenuti nei settori culturali e creativi attraverso la cooperazione intersetoriale e transfrontaliera. Un obiettivo ambizioso che solleva problematiche condivise di tipo tecnologico, di coordinamento, di condivisione, di copyright, di standardizzazione delle procedure, ed evidenzia il necessario miglioramento delle competenze degli operatori (in particolare, in materia di gestione e analisi dei dati, *Artificial Intelligence* (AI), digitalizzazione avanzata, modellazione 3D e tecnologie di realtà aumentata) attraverso programmi di formazione, scambio delle migliori pratiche e collaborazione tra le istituzioni, oltre che la definizione di aggiornate strategie per accelerare la trasformazione digitale del settore. Beni culturali a rischio, edifici, siti e monumenti più visitati dovranno essere in gran parte digitalizzati in 3D entro il 2030, tenendo in considerazione aspetti quali fruitori, alta qualità e preservazione a lungo termine delle risorse (EC, 2021). Una prima risposta a tali raccomandazioni può essere riscontrata nelle risorse impegnate dai programmi di investimento dei Piani Nazionali di Ripresa e Resilienza di alcuni stati membri che prevedono specifiche azioni e strumenti a supporto della digitalizzazione delle risorse culturali (EC, 2022).

European level through funding programmes, policies and actions aimed at testing the most innovative digital technologies in the cultural and creative sector.

Research infrastructures with a particular focus on CH – such as DARI-AH (<https://www.dariah.eu/>), CLAR-IN (<https://www.clarin.eu/>) or E-RISH (<http://www.e-rihs.eu/>) – contributed to the access and knowledge of digital tools and services; while several European projects have reported a significant impact in terms of implementation of applications, guidelines, protocols, models and platforms – such as ARIADNEplus (<https://ariadne-infrastructure.eu/>), 3D-ICONS (<http://3dicons-project.eu/>) or Europeana (<https://www.europeana.eu/it>), to name a few.

The value of advanced digital technologies and skills in the economy and

society emerges from the objectives of the funding programme "Digital Europe (DIGITAL)" – developed within the framework of the most general "DIGITAL Europe Work Programme 2021-2022" (EP and the Council of the European Union, 2021). The project envisages the creation of a common European data space that includes CH among the identified areas of interest: an open platform that will support the digital transformation, promoting the accessibility of high value data sets, the creation and re-use of content in the cultural and creative sectors through cross-sectoral and cross-border cooperation. An ambitious goal that raises shared issues of technology, coordination, sharing, copyright, standardisation of procedures, and highlights the necessary improvement of operators' skills (in particular, on data management

Lo scenario descritto rimarca l'importanza di definire condizioni comuni su cui fondare il processo di digitalizzazione di beni, servizi e processi che possano migliorare la gestione e la conservazione del patrimonio, capaci di integrare le nuove tecnologie con quelle più consolidate, oltre a soddisfare i bisogni di un ampio target di utenti. Rispetto a tale quadro, le attività di ricerca del progetto Horizon 2020 "4CH – Competence Centre for the Conservation of Cultural Heritage" (GA 101004468, <https://www.4ch-project.eu/>) rappresentano un valido contributo alla riflessione sui diversi aspetti correlati al ruolo delle tecnologie digitali abilitanti applicate alla salvaguardia del PC.

#### Il ruolo delle tecnologie digitali per il progetto 4CH

Il progetto 4CH, avviatosi nel gennaio 2021 e di durata triennale, lavora alla definizione del quadro metodologico, procedurale e organizzativo per la creazione di un Centro Europeo di Competenza (CC) sui Beni Culturali. La missione del futuro centro sarà fornire consulenza, supporto e servizi all'ampio bacino di utenti del settore, promuovendo l'uso delle tecnologie integrate più all'avanguardia, sviluppando standard e protocolli per facilitarne l'uso più appropriato, trasferendo conoscenze su scienze del patrimonio, opportunità di finanziamento e buone pratiche a livello europeo e internazionale, facilitando il coordinamento e la collaborazione, interdisciplinare e interistituzionale. Una particolare attenzione è rivolta alla modellazione 3D e a soluzioni ICT per la documentazione, la conservazione, la mitigazione del rischio, la preservazione e la valorizzazione di monumenti e siti (Maietti *et al.*, 2021).

4CH costituirà un'infrastruttura di networking su tre livelli,

and analysis, *Artificial Intelligence* (AI), advanced digitisation, 3D modelling and augmented reality technologies) through training programmes, exchange of best practices, and collaboration between institutions, and the definition of up-to-date strategies to accelerate the digital transformation of the sector. It is an ambitious goal that raises common issues related to technology, coordination, sharing, copyright, standardisation of procedures, and highlights the necessary improvement of professional skills (in particular, in the field of management and data analysis, *Artificial Intelligence* (AI), advanced digitisation, 3D modelling and augmented reality technologies) through training programmes, exchange of best practices, and collaboration between institutions, and the definition of up-to-date strategies to accelerate the digital transformation

of the sector. At-risk cultural heritage, most visited buildings, sites and monuments will have to be largely digitised in 3D by 2030, considering aspects such as, users, high quality and long-term preservation of the resources (EC, 2021).

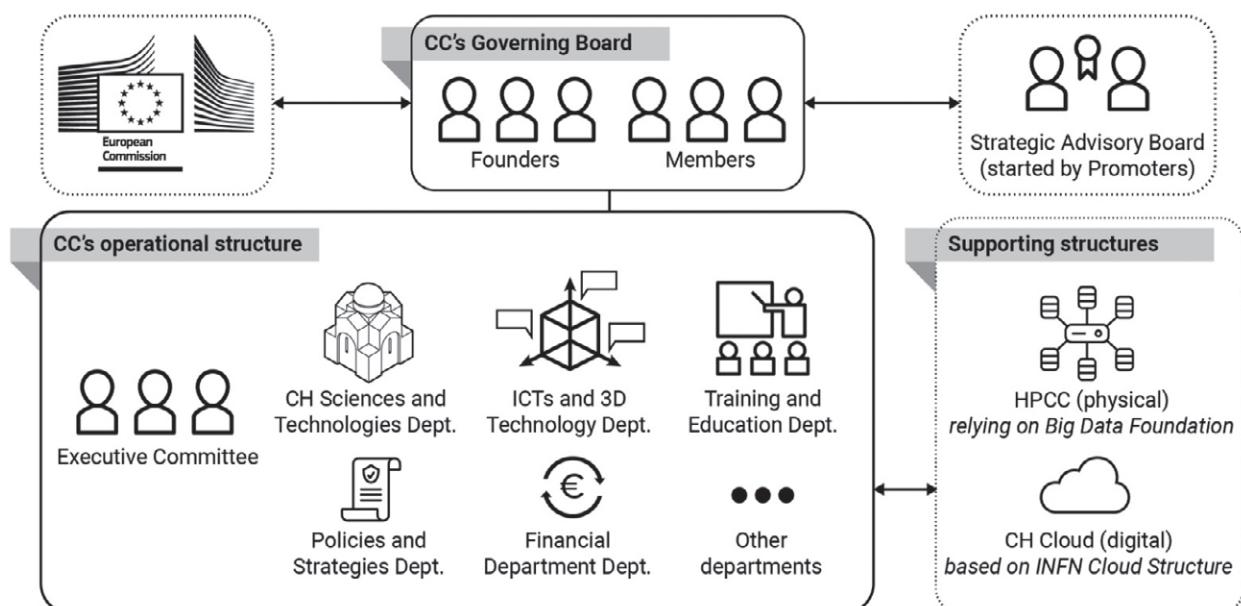
A first response to these recommendations can be recognised in the investment programmes of the National Recovery and Resilience Plans presented by some member states that provide specific actions and tools to support the digitisation of CH (EC, 2022).

The above scenario underlines the importance of defining common conditions on which to base the process of digitisation of CH assets, services and processes that can improve the management and conservation of heritage, capable of integrating new technologies with more consolidated ones, as well as meeting the needs of a broad

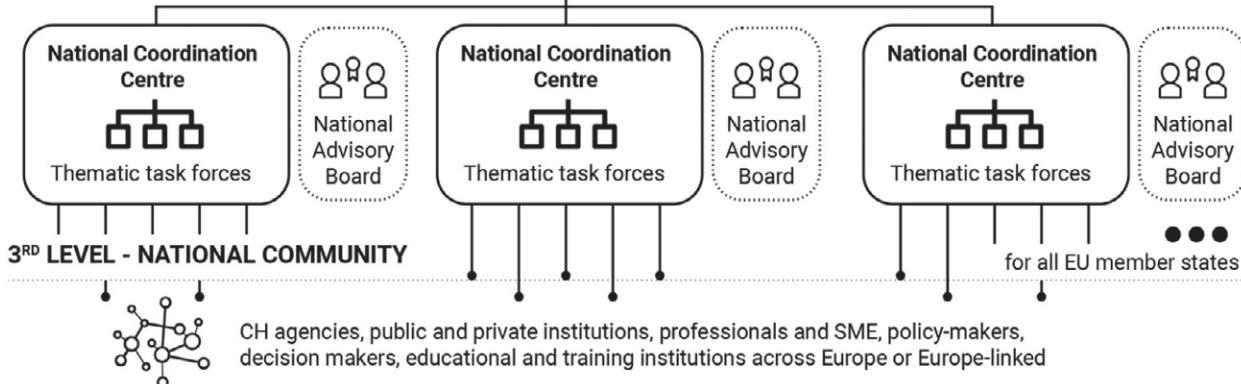
definita da un *hub* centrale, il Centro di Competenza Europeo (livello 1), in grado di operare in sinergia con una rete di nodi nazionali (livello 2). Il network nazionale sarà affidato a *cluster* di istituzioni, enti e centri di ricerca, sia pubblici sia privati, capaci di rispondere alle specifiche condizioni degli Stati di appartenenza in termini legali, amministrativi, finanziari, gestionali, di coordinamento con gli archivi locali, e così via. Inoltre, vi collaboreranno le comunità nazionali di professionisti e PMI, associazioni, industrie creative e dell'ospitalità, *policy-makers*, ed enti che si occupano di digitalizzazione, creazione di contenuti culturali, servizi educativi e turistici (livello 3) (Fig. 1). In termini di servizi strettamente correlati all'uso di tecnologie e strumenti, 4CH include tra i suoi obiettivi la realizzazione di

due strutture operative esterne. La prima è uno spazio digitale collaborativo, il “Cultural Heritage Cloud”, che renderà disponibili repository di dati e metadati, standard e linee guida per l'acquisizione, la gestione, la conservazione e il riuso di tali risorse, un portfolio di *software* e strumenti digitali (compresa la necessaria formazione), nonché ulteriori risorse e applicativi funzionali alla ricerca e agli interventi sui Beni Culturali. La seconda è il centro “High Performance Computing”, uno spazio fisico, che si appoggerà a un'altra infrastruttura HPCC già operativa che sfrutterà i servizi sviluppati da 4CH (Fig. 2). Il CC promuoverà l'applicazione di soluzioni e tecnologie ICT all'avanguardia, inclusa la modellazione 3D, *digital twins*, VR, *cloud computing*, AI, IoT, riconoscendone il potenziale in di-

## 01 | 1<sup>ST</sup> LEVEL - EUROPEAN COMPETENCE CENTRE



## 2<sup>ND</sup> LEVEL - NATIONAL NETWORK



versi campi di applicazione come la documentazione, la conservazione, il monitoraggio, la manutenzione, la mitigazione dei rischi e la prevenzione da disastri naturali e azioni antropiche, tra cui inquinamento, riscaldamento globale e conflitti bellici (Niccolucci *et al.*, 2022). Oltre che per tali ambiti più "tradizionali", 4CH riconosce e promuove il valore e il ruolo delle tecnologie abilitanti come supporto per la comunicazione, la formazione, l'educazione, l'accessibilità e il coinvolgimento degli utenti, aprendosi a nuove sperimentazioni e applicazioni.

### **Verso una base di conoscenza per la salvaguardia, la conservazione e la valorizzazione del Patrimonio Culturale**

zazione del PC.

Con l'obiettivo di trarre indicazioni e lezioni utili a delineare la struttura, requisiti e missione del futuro CC, le attività preliminari hanno interessato lo studio di una selezione di 51 centri e istituzioni operanti a livello Europeo e internazionale, tra cui *Research Infrastructures*, istituti di restauro, biblioteche e aggregatori digitali, ecc. (Fig. 3). Tra i diversi aspetti, sono stati indagati il ricorso a strumenti e tecnologie per la creazione, gestione e conservazione di basi di dati, oltre che per il coinvolgimento dell'ampio ecosistema delle parti interessate (istituzioni pubbliche, ricercatori e centri di ricerca, decisori politici, università, aziende, enti, industrie, associazioni, professionisti e cittadini).

target audience. In this context, the research activities of the Horizon 2020 project "4CH – Competence Centre for the Conservation of Cultural Heritage" (GA 101004468, <https://www.4ch-project.eu/>) provide a valuable contribution to address a reflection on the different aspects related to the role of digital enabling technologies applied to safeguarding the CH.

### **The role of digital technologies for the 4CH project**

The 4CH project, launched in January 2021 and lasting three years, works on defining the methodological, procedural and organisational framework for the creation of a European Competence Centre (CC) on Cultural Heritage. The mission of the future CC will be to provide advice, support and services to the wide range of users of the sector, promoting the most advanced

Definire la visione e le attività del futuro CC Europeo impone al progetto 4CH una riflessione sul ruolo delle tecnologie digitali ed ICT nelle diverse attività che afferiscono a conservazione, preservazione e valorizza-

La costruzione della base di conoscenza è stata integrata da un'analisi di buone pratiche, progetti Europei, documenti di indirizzo e programmi dedicati alla salvaguardia del PC. L'esito è una raccolta di risorse bibliografiche, un portfolio di casi studio e un abaco di tecnologie, strumenti, processi, figure e professionalità coinvolte, soluzioni, campi di applicazione che potranno essere integrati alle raccomandazioni del CC. La strategia di mappatura ha seguito una apposita metodologia, volta in primis all'individuazione dei criteri di selezione per le informazioni da analizzare, organizzate e restituite criticamente utilizzando matrici elaborate ad hoc (Fig. 4).

Vista l'estensione del concetto di PC, la definizione di un quadro descrittivo delle tipologie di patrimonio indagato (costruzioni antiche, siti archeologici, spazi urbani, paesaggio, ecc.) e delle molteplici categorie operative di intervento riconducibili a tutela, conservazione e valorizzazione del PC (documentazione, comunicazione, diagnostica, consolidamento, rinforzo, riutilizzo adattivo, accessibilità, programmi educativi e di formazione, partnership e networking, ecc.), così come estrapolate dai documenti più rilevanti sulla salvaguardia del PC (es. Carte, programmi, linee guida, ecc.), ha supportato le successive fasi di analisi e comparazione dei risultati, oltre che aver facilitato la verifica della rappresentatività del campione di casi.

I risultati sono stati ordinati su base tematica individuando cinque macrocategorie descrittive del principale portato innovativo fornito dagli interventi analizzati:

1. innovazione digitale;
2. sviluppo e/o sperimentazione di tecniche e metodologie;
3. trasferibilità;
4. politiche e strategie di governance;

integrated technologies, developing standards and protocols to facilitate their appropriate use, transferring knowledge on heritage sciences, funding opportunities and best practices at European and international level, facilitating the interdisciplinary and interinstitutional coordination and collaboration. Particular attention is paid to 3D modelling and ICT solutions for documentation, conservation, risk mitigation, preservation and enhancement of monuments and sites (Maietti *et al.*, 2021).

4CH will constitute a triple-level networking infrastructure, defined by a central hub, the European Competence Centre (level 1) able to operate in synergy with a network of national nodes (level 2). The national network will be entrusted to clusters of institutions, bodies and research centres, both public and private, capable of

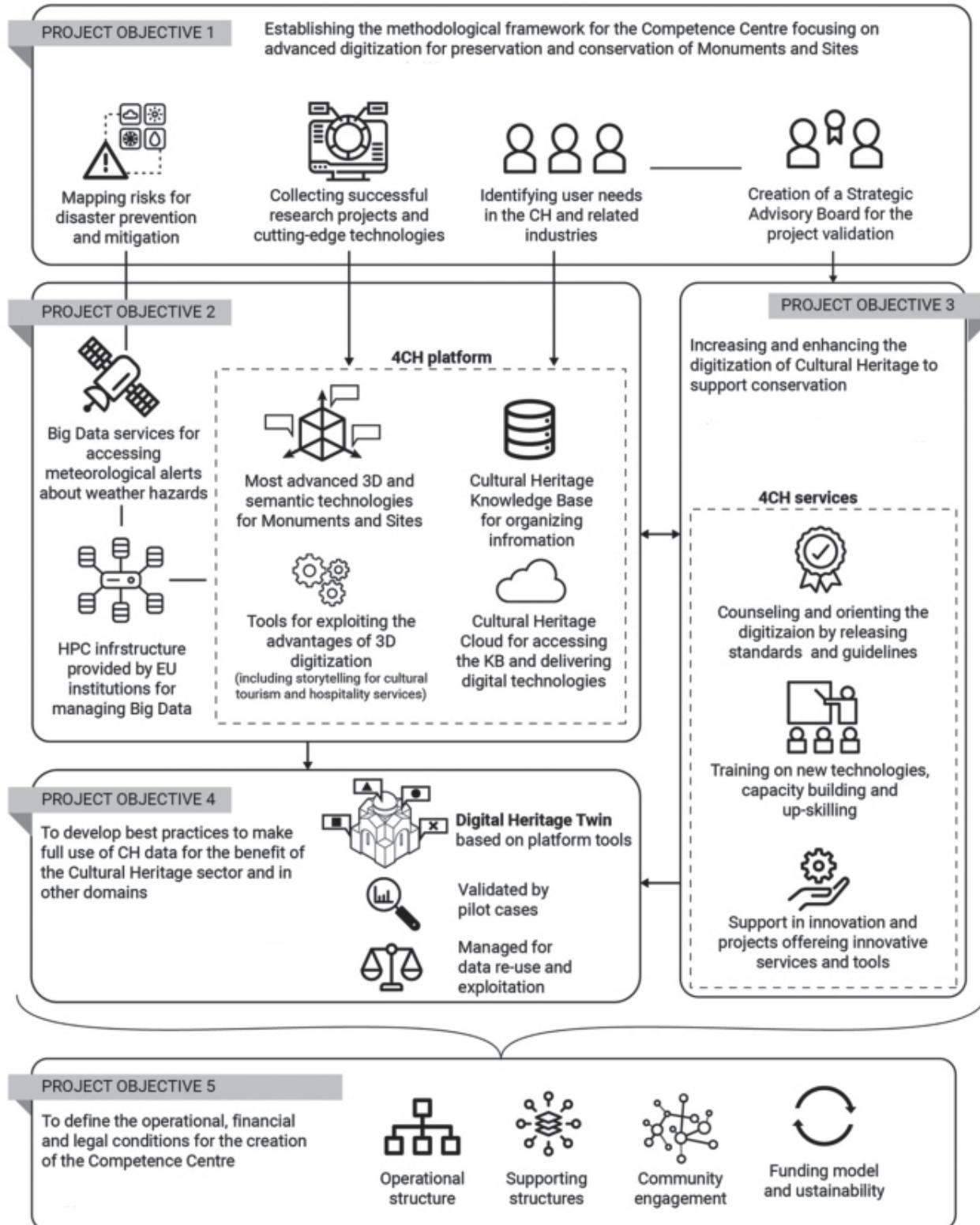
responding to the specific conditions of the States in terms of legal, administrative, financial and management aspects, coordination with local archives, and so on. Furthermore, the national communities of professionals and SMEs, associations, creative and hospitality industries, policymakers, and bodies that deal with digitisation, creation of cultural content, educational and tourism services will collaborate (level 3) (Fig. 1).

In terms of services closely related to the use of technologies and tools, 4CH includes among its objectives the creation of two external operating structures. The first is a collaborative digital space, the "Cultural Heritage Cloud", which will make available repositories of data and metadata, standards and guidelines for the acquisition, management, storage and reuse of these resources, a portfolio of software and

digital tools (including the necessary training), as well as additional resources and applications functional to research and interventions on CH. The second structure is the 'High Performance Computing Centre', a physical space, which will rely on an already operational HPCC infrastructure that will exploit the services developed by 4CH (Fig. 2).

The CC will promote the application of cutting-edge ICT solutions and technologies, including 3D modelling, digital twins, VR, cloud computing, AI and IoT, recognising their potential in different fields of application, such as documentation, storage, monitoring, maintenance, risk mitigation and prevention of natural disasters and anthropic actions, including pollution, global warming and conflict (Niccolucci *et al.*, 2022). In addition to these more "traditional" areas, 4CH

02 |



5. coinvolgimento di un ampio target di attori e stakeholders, sfruttamento del PC come risorsa sociale ed economica, pratiche di innovazione sociale.

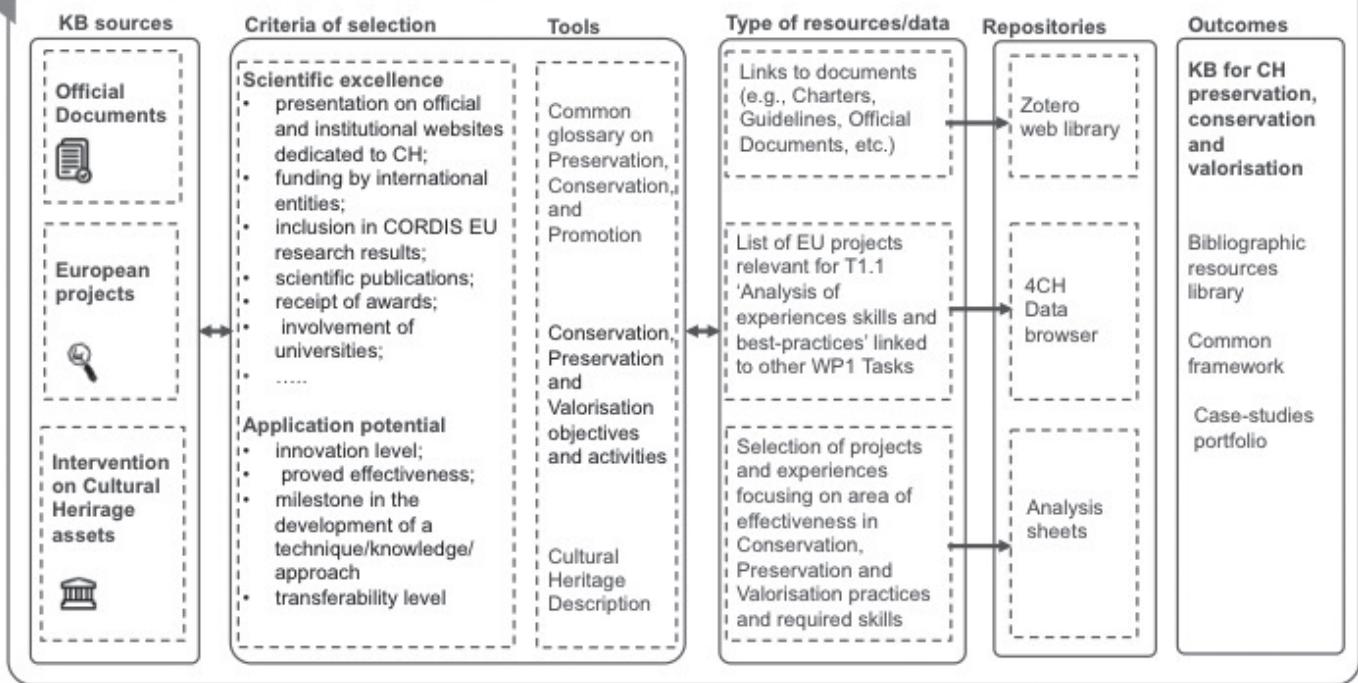
Le macrocategorie rispondono alle caratteristiche in comune tra più buone pratiche, dimostrando il carattere trasversale del-

le azioni sul PC, come emerge ad esempio dal frequente ricorso alle tecnologie digitali come medium tra processi e ambiti di intervento.

La digitalizzazione si conferma come efficace dispositivo di documentazione, visualizzazione e conseguente valorizzazio-

Nr.	Name	Main field	Nr.	Name	Main field
<b>European Commission Competence Centres</b>					
1	Competence Centre on Behavioural Insights	Behavioural Insights	27	European Cybersecurity Network (CONCORDIA, ECHO, SPARTA, CyberSec4Europe)	Cybersecurity
2	Competence Centre on Foresight	Foresight	28	EuroCC project - National Competence Centre (NCC)	High Performance Computing
3	Competence Centre on Microeconomic Evaluation - ME	Microeconomic	<b>Digital Innovation Hubs</b>		
4	Competence Centre on Text Mining and Analysis - TMA	Text Mining and Analysis	29	Digital Innovation Hubs (DIHs)	Digital infrastructures and innovation
5	Competence Centre on Modelling - MOD	Modelling	<b>Documentation Centres on Cultural Heritage</b>		
6	Competence Centre on Technology Transfer - TT	Technology Transfer	30	Europeana	Cultural Heritage
7	Competence Centre on Composite Indicators and Scoreboards - COIN	Composite Indicators and Scoreboards	31	France Archive	Cultural Heritage
8	Competence Center on Cybersecurity Industrial, Technology and Research	Cybersecurity	32	Culturaitalia	Cultural Heritage
<b>European Commission Knowledge Centres</b>					
9	Knowledge Centre for Bioeconomy	Biodiversity and Bioeconomy	33	General Catalogue of Cultural Properties (Italy)	Cultural Heritage
10	Knowledge Centre for Biodiversity	Biodiversity and Bioeconomy	34	Institute for Cataloguing and Documentation (ICCD)	Cultural Heritage
11	Disaster Risk Management Knowledge Centre	Disaster Risk	35	Central Institute for the Union Catalogue of Italian libraries and for bibliographic information (ICCU)	Cultural Heritage
12	Knowledge Centre for Food Fraud and Quality	Food	36	Archaeology Data Service	Cultural Heritage
13	Knowledge Centre for Global Food and Nutrition Security	Food	37	Digital Public Library of America	Cultural Heritage
14	Health Promotion and Disease Prevention Knowledge Gateway	Health	38	MUSEU – HUB	Cultural Heritage
15	Knowledge Centre on Migration and Demography	Migration and Demography	39	La Plateforme Ouverte du Patrimoine (POP)	Cultural Heritage
16	Knowledge Centre for Territorial Policies	Policies	40	Connecting Archaeology and Architecture in Europe (CARARE)	Cultural Heritage
<b>Other national and international centres on Cultural Heritage</b>					
<b>European Commission Knowledge Services</b>					
41	Spanish cultural Heritage Institute   Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE)	Cultural Heritage			
17	AI Watch	Artificial Intelligence	42	Centro per la Conservazione ed il Restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale" (CCR)	Cultural Heritage
<b>National Competence Centres (European)</b>					
18	Spanish National Renewable Energy Centre CENER	Renewable Energy	43	Istituto Centrale per il Restauro (ICR)	Cultural Heritage
19	Bi-Rex	Industry 4.0	44	Opificio delle Pietre Dure (OPD)	Cultural Heritage
20	Italian Computing Data Infrastructure (ICDI) Competence Center	Digital infrastructures and innovation	45	Getty Center	Cultural Heritage
21	Dutch National Centre of Expertise and Repository for Research Data (DANS)	Cultural Heritage	46	Le laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH)	Cultural Heritage
<b>Research infrastructures</b>					
22	Digital Research Infrastructure for the Arts and Humanities - DARIAH	Cultural Heritage	47	The Centre for Research and Restoration of the Museums of France (C2RMF)	Cultural Heritage
23	European Research Infrastructure for Language Resources and Technology - CLARIN	Languages	48	Docomomo international	Cultural Heritage
24	Open AIRE	Open Access Research	49	The Discovery Programme: Centre for Archaeology and Innovation Ireland	Cultural Heritage
25	CINECA	High Performance Computing	50	Transport Infrastructure Ireland, Archaeology and Heritage section	Cultural Heritage
26	Consortium of European Social Science Data Archives (CESSDA)	Social science	51	Institutul Național al Patrimoniului (INP)	Cultural Heritage

### Mapping strategy and Working methodology



ne del PC, in particolare quando finalizzata a comunicazione e forme di accessibilità, in situ e da remoto.

Le tecnologie ICT, a servizio di repositories/database online, rivelano il proprio potenziale abilitante per attività di conoscenza/ricerca ed educazione, rivolte ad ampie tipologie di utenti, agevolando l'accesso e il riuso di dati, così come emerge dalle applicazioni sviluppate dal progetto INCEPTION all'Ospedale degli Innocenti di Firenze (INCEPTION, 2019) - mappato come

recognises and promotes the value and role of the enabling technologies as support for communication, training, education, accessibility and involvement of a broad target of users, opening up to new experimentations and applications.

#### Towards a knowledge base for safeguarding, conservation and enhancement of Cultural Heritage

Setting up the vision and activities of the future European CC requires the 4CH project to reflect on the role of digital and ICT technologies in the various activities related to the safeguarding, preservation and enhancement of CH.

With the aim of drawing useful indications and lessons to outline the structure, requirements and mission of the future CC, the preliminary steps involved the study of a selection of 51

centres and institutions operating at European and international level, including Research Infrastructures, restoration institutes, libraries and digital aggregators, etc. (Fig. 3).

Among the different aspects, the use of tools and technologies for the creation, management and conservation of databases was investigated, as well as for the involvement of the large ecosystem of stakeholders (public institutions, researchers and research centres, policymakers, universities, companies, organisations, industries, associations, professionals and citizens).

The knowledge base was integrated with an analysis of best practices, European projects, steering documents and programmes dedicated to CH protection. The outcome is a collection of bibliographic resources, a portfolio of case studies and an abacus of technologies, tools, processes, actors and

rilevante per quattro categorie su cinque.

Il coinvolgimento degli stakeholders anche in termini di co-progettazione e co-gestione del PC, si configura sia come obiettivo sia come impatto nelle esperienze riguardanti piattaforme transdisciplinari che combinano la visualizzazione 3D ad altri dati per una miglior comprensione del bene, consentendo interazione, personalizzazione di ricerca ed approfondimento, talvolta passando attraverso il gioco. Un

professionals involved, solutions, areas of application that can be integrated to the recommendations of the CC.

The mapping strategy followed a specific methodology, aimed primarily at identifying the selection criteria for the information to be analysed, critically organised and returned using ad hoc matrices (Fig. 4).

Considering the multiplicity of the CH concept, the definition of a descriptive framework of the investigated heritage types (e.g. ancient buildings, archaeological sites, urban spaces, landscape, etc.) and the several operational categories of intervention related to the protection, conservation and enhancement of the CH (e.g. documentation, communication, diagnostics, consolidation, reinforcement, adaptive reuse, accessibility, educational and training programmes, partnerships and networking, etc.), as extrapolated

from the most relevant documents on safeguarding CH (e.g. Charts, programmes, guidelines, etc.), supported the subsequent phases of analysis and comparison of results, and facilitated the assessment of representativeness of the sample cases.

The results were sorted on a thematic basis by identifying five descriptive macro-categories of the main innovative contribution provided by the interventions analysed:

1. digital innovation;
2. development and/or experimentation of techniques and methodologies;
3. transferability;
4. governance policies and strategies;
5. involvement of a broad target of actors and stakeholders, exploitation of CH as a social and economic resource, practices of social innovation.

esempio è il progetto sviluppato dal Cyprus Institute per la Pafos Gate a Nicosia, selezionato tra le migliori pratiche internazionali di co-creazione di spazi pubblici (Cyprus Institute, 2017). Oltre che per l'innovazione digitale, il caso studio è significativo in termini di networking e di scambio con le comunità di riferimento.

Alcuni contributi mostrano lo sfruttamento del *digital twin* ai fini di monitoraggio e previsione dei rischi in monumenti e siti, abilitando la pianificazione delle relative scelte di prevenzione e mitigazione, o facilitando scelte di musealizzazione sulla base della simulazione dei percorsi dei visitatori, come sperimentato per il sito archeologico di Choirokoitia, Cyprus (4CH, 2022).

La ricostruzione digitale, supportata dalla realtà aumentata, tecnologie 3D e sistemi di geolocalizzazione, può offrire un'esperienza non convenzionale del PC a 360°, capace di integrare dato storico e condizione attuale, di cui il progetto "Streetmuseum" a Londra rappresenta una significativa applicazione nel settore della musealizzazione (Panciroli *et al.*, 2017).

Altri strumenti abilitanti mappati includono portali integrati per la comunicazione e la promozione del turismo culturale basati sui social media. Essi rappresentano modelli potenzialmente trasferibili e replicabili, come quello attivato per la Piattaforma di Integrazione Digitale "SmartLand@Pompeii" nell'ambito del "Grande Progetto Pompei" (2017).

I risultati raccolti forniscono un contributo che mette in risalto il potenziale abilitante delle tecnologie sia in campi di applicazione tradizionali sia in quelli non convenzionali, oltre che porre l'accento sulle competenze, multidisciplinari e integrate, che tali scenari richiedono.

In merito a quest'ultimo punto, anche ai fini della definizione

The macro-categories respond to the common characteristics of several best practices, demonstrating the transversality of the actions on CH, as evidenced for instance by the frequent use of digital technologies as a medium between processes and fields of intervention.

Digitisation is confirmed as an effective device for documentation, visualisation and consequent enhancement of CH, in particular when aimed at communication and forms of accessibility, both on site and remotely.

ICT technologies, supporting online repositories/databases, reveal their enabling potential for knowledge/research and education activities, intended for a broader audience of users, facilitating access and reuse of data, as it comes up from the applications developed by the INCEPTION project on the Ospedale degli Innocenti

in Florence (INCEPTION, 2019), mapped as relevant for four categories out of five.

The involvement of stakeholders, also in terms of co-design and co-management of CH, appears both as an objective and as an impact in the analysed experiences regarding transdisciplinary platforms that combine 3D visualisation with other data for a better understanding of the asset, allowing interaction, personalisation of research and in-depth studies, sometimes relying on gaming. An example is the project developed by the Cyprus Institute for the Pafos Gate in Nicosia, selected among the best international practices of co-creation of public spaces (Cyprus Institute, 2017). In addition to digital innovation, the case study is significant in terms of networking and exchange with local communities.

Some contributions show the exploita-

dei servizi erogati dal CC, l'analisi su esperienze e buone pratiche è stata integrata dall'identificazione di specifiche *skills*, intese come abilità di applicare conoscenze e competenze, cognitive e pratiche, associate per ciascun intervento ai diversi ambiti che ne determinano il potenziale di innovazione (Fig. 5).

Ad esempio, si conferma l'importanza progressivamente assunta da conoscenze tecnologiche/digitali a supporto di attività legate a documentazione, ricerca storico-bibliografica e monitoraggio. Ciò che emerge è inoltre il crescente ricorso a *skills* riguardanti comunicazione, formazione ed educazione, mappatura delle esigenze degli utenti, coinvolgimento e partecipazione delle comunità.

Il quadro risultante attesta, quindi, da un lato la dimensione complessa e transdisciplinare del PC e dall'altro riconosce il valore abilitante di strumenti come ICT, 3D, realtà virtuale, cloud, ecc. – e relative abilità – come trasversale rispetto alle molteplici attività che si riferiscono al PC. Le buone pratiche selezionate come casi studio rappresentano un valido supporto per comprendere come il ruolo di tali tecnologie, in costante evoluzione, vada oltre l'aspetto puramente tecnico e specialistico, dimostrando il proprio potenziale in molteplici ambiti di applicazione, soprattutto come supporto a processi e sperimentazioni innovative ai fini della salvaguardia e della valorizzazione del PC, nella sua dimensione materiale e immateriale.

## Conclusioni

La digitalizzazione è oramai riconosciuta come strumento efficace per la conservazione e valorizzazione del PC, tanto da far parte delle strategie chiave dell'UE: la *Digital Strategy* prevede in tempi rapidissimi l'incremento delle risorse digitali e la crea-

tion of the digital twin for monitoring and forecasting risks in monuments and sites, enabling the planning of the related solutions of prevention and mitigation, or facilitating musealisation design choices based on the simulation of visitor routes, as experienced for the archaeological site of Choirokoitia, Cyprus (4CH, 2022).

The digital reconstruction, supported by augmented reality, 3D technologies and geolocation systems, can offer an unconventional 360-degree experience of CH, capable of integrating historical data and current condition, with respect to which the 'Streetmuseum' project in London represents a significant application in the museum sector (Panciroli *et al.*, 2017).

Other enabling tools mapped include integrated portals for communication and promotion of cultural tourism based on social media. They are potentially transferable and replicable models, such as the one activated for the Digital Integration Platform "SmartLand@Pompeii" as part of the 'Great Pompeii Project' (2017).

The collected results provide a contribution that highlights the enabling potential of technologies in both traditional and unconventional fields of application, as well as acknowledging the multidisciplinary and integrated skills that such scenarios require.

Regarding the latter point, also for the purposes of defining the services provided by the CC, the analysis of experience and best practice has been complemented by the identification of specific skills, meant as the ability to apply knowledge and competence, both cognitive and practical, associated to the different areas that determine the innovation potential for each intervention (Fig. 5).

05 | Tabella di sintesi per l'analisi delle buone pratiche elaborata nell'ambito delle attività di ricerca del WPI. Le azioni di conservazione, preservazione e valorizzazione del PC sono associate alle cinque aree di rilevanza individuate. Le celle sono state riempite fornendo informazioni sulle 'abilità' coinvolte. (Crediti: 4CH\_Gruppo di Ricerca Task I.1).

Example of a synthesis table from the standard sheet used for the analysis of best practice developed as part of the research activities of WPI. The operational activities of conservation, preservation and enhancement of CH are associated with the five areas of relevance identified. The cells were filled with information about the skills involved. (Credits: 4CH\_T1.I Research Team).

05 |

#### 4. SYNTHESIS SHEET

BP\_007

Conservation	Preservation	Valorisation	(select from list) (add text)	Area of effectiveness in Conservation, Preservation and Valorisation practices				
			Activities	DIGITAL INNOVATION	DEVELOPMENT AND/OR EXPERIMENTATION OF TECHNIQUES AND METHODOLOGIES	TRANSFERABILITY	POLICIES AND GOVERNANCE STRATEGIES	ENGAGEMENT, EXPLOITATION AND SOCIAL INNOVATION
•	•	•	<b>Historic and bibliographic research</b>	Skills on digitalisation				
•	•	•	<b>Studies on CH</b>	Skills on digitalisation				
•	•	•	<b>Documentation of CH</b>	Skills on digitalisation				
•	•	•	<b>Communication of CH</b>	Skills on digitalisation				Skills on mapping and analysis of users' needs and requirements
•	•		Preventive conservation					
•	•		Diagnostic activities					
•	•		Identification of the risks and deterioration patterns					
•	•		Materials conservation tests					
•	•		Pre-consolidation, cleaning, consolidation and protection of CH materials					
•	•		Reinforcement of CH buildings					
•	•		Monitoring					
•	•		Maintenance practices					
•	•		Management and administration practices					
•	•	•	Promotion and support of interventions for conservation					
•	•	•	Project of restoration					
•			Reconstruction					
•	•		Adaptive re-use of CH					
•	•		Accessibility					
			Dissemination through publications					
			Organisation of events and festivals					
			Encounters with communities					
			Educational activities and programmes					
			<b>Creation of partnership and networking</b>				Skills on encourag ing and supportin g the developm ent of networks	
			• Advertisements with CH					
			• Gaming with CH					

zione di un comune e dedicato *digital data space*. La pandemia da COVID-19 ha ulteriormente accresciuto l'importanza della digitalizzazione, portando il settore dei Beni Culturali ad ampliare i servizi online e sperimentare nuove forme di accesso all'offerta culturale (Vayanou *et al.*, 2020).

I risultati di ricerca del progetto 4CH apportano un contributo innovativo nel mostrare come il processo di digitalizzazione nell'ambito della salvaguardia del PC rappresenti un campo di indagine in rapidissima evoluzione, che coinvolge un sistema complesso di fattori, e debba essere affrontato seguendo un approccio olistico e aperto nel fare propri nuovi ambiti di utilizzo, strumenti, competenze e figure professionali, in modo da rispondere in maniera più efficace alle sfide globali che direttamente o indirettamente coinvolgono il patrimonio.

In un tale contesto sempre più multidisciplinare, la condivisione di basi comuni è elemento sfidante ma necessario: termini, concetti e procedure devono essere definiti e accettati tra i diversi soggetti coinvolti per evitare discrepanze semantiche e favorire lo scambio ed il riuso dei dati. Un obiettivo che implica l'integrazione di nuove conoscenze, approcci e strategie nella cultura tecnica consolidata, rispetto alla quale le tecnologie digitali possono essere complementari, consentire la gestione più efficace delle crescenti complessità e abilitare nuovi processi di prevenzione, tutela, gestione e anche progettazione degli interventi. Tale capacità abilitante si riflette nello sviluppo del potenziale d'uso in nuovi ambiti di azione e da parte di nuove professionalità, che spesso ibridano vari settori di competenza. Oltre a quelli più "tradizionali" come la ricerca, il restauro, la documentazione, ecc., la digitalizzazione del PC investe lo sviluppo economico e sociale, l'educazione, il turismo, e apre alla

For example, the importance gradually assumed by technological/digital knowledge supporting activities related to documentation, historical-bibliographic research and monitoring is confirmed. What also emerges is the increasing role of skills related to communication, training and education, mapping of user needs, involvement and participation of communities.

Hence, the resulting framework attests, on the one hand, the complex and transdisciplinary dimension CH, while, on the other, acknowledging the enabling value of tools and technologies such as ICT, 3D, virtual reality, Cloud, etc. - and related skills - as transversal with respect to the many activities related to the CH assets.

The best practices selected as case studies represent a valid support for understanding how the role of these constantly evolving technologies

goes beyond the purely technical and specialist aspect, demonstrating its potential in multiple fields of application, especially as a medium for the activation of innovative processes and experiments for safeguarding and enhancing CH in its tangible and intangible dimension.

### Conclusions

Digitisation is now recognised as an effective tool for CH preservation and enhancement, so as to be part of the EU's key strategies. Indeed, the Digital Strategy provides for the rapid increase in digital resources and the creation of a dedicated common digital data space. The COVID-19 pandemic has further increased the importance of digitisation, leading the CH sector to foster online services and experiment with new forms of access to cultural activities (Vayanou *et al.*, 2020).

partecipazione e al coinvolgimento di comunità locali e industrie creative, e professionalità emergenti, come ad esempio il curatore di dati.

Il futuro CC Europeo, come strutturato dal progetto 4CH, ha l'obiettivo di contribuire alla trasformazione digitale e al processo di digitalizzazione avanzata delle risorse culturali, sfruttando le tecnologie più innovative e seguendo un approccio interdisciplinare, olistico e collaborativo tra saperi teorici e pratici, tra istituzioni e stakeholders. Come esempio del ruolo affidato da 4CH alle tecnologie abilitanti, il progetto ha recentemente lanciato l'iniziativa "SUM – Save the Ukraine Monuments" (<https://www.4ch-project.eu/sum-save-the-ukraine-monuments-video-presentation/>), collaborando con altre istituzioni e organizzazioni culturali europee per raccogliere la documentazione digitale del PC ucraino, minacciato dal conflitto bellico. Dati, contenuti e risorse sono stati duplicati e temporaneamente trasferiti su server dell'Unione Europea, rendendo contestualmente possibile la preservazione della memoria e la conservazione di preziosi documenti e informazioni a supporto di future azioni di ripristino del patrimonio a rischio.

Per il progetto 4CH, l'adozione e lo sviluppo di strumenti si integra alla messa a punto delle necessarie conoscenze, basi di dati digitali, procedure, standard e servizi a supporto delle attività di salvaguardia di monumenti e siti storici, favorendo l'attuazione di iniziative che, come auspicato dalle politiche di indirizzo Europeo, aumentino rapidamente il numero, la disponibilità e soprattutto la qualità delle risorse digitalizzate, da rendere disponibili per far fronte alle crisi globali che minacciano le risorse naturali e culturali.

The research results of the 4CH project bring an innovative contribution in showing how the digitisation process in the CH safeguarding context is a rapidly evolving field of investigation, involving a complex system of factors, and how it must be addressed following a holistic and open approach in embracing new areas of use, tools, skills and professional figures, in order to respond more effectively to global challenges that either directly or indirectly involve the CH assets.

In such a multidisciplinary context, the sharing of common bases is a challenging but necessary step. Terms, concepts and procedures must be defined and accepted among the various subjects involved, to avoid semantic discrepancies and favour the exchange and reuse of data. A commitment that implies the integration of new knowledge, approaches and strategies in the

consolidated technical culture, with respect to which digital technologies can be complementary, allow the more effective management of an increasing complexity, and enable new processes of prevention, protection, management and even design interventions. This enabling capability is reflected in the enhancement of the potential for use in new fields of action and by new professional profiles, which often hybridise various areas of expertise. In addition to more 'traditional' ones, such as research, restoration, documentation, etc. the digitisation of CH involves economic and social development, education and tourism, opening to the participation and engagement of local communities and creative industries, as well as emerging figures, such as the data curator.

The future European CC, as envisaged by the 4CH project, aims to contribute

## RICONOSCIMENTI

Il progetto di ricerca “4CH-Competence Centre for the Conservation of Cultural Heritage”, cofinanziato dalla Commissione Europea nell’ambito del Programma Quadro HORIZON 2020 (G.A. n. 101004468, 1 gennaio 2021 – 31 dicembre 2024), è sviluppato da un Consorzio di 19 partners provenienti da 12 paesi europei sotto la guida di INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare).

<https://www.4ch-project.eu>

## REFERENCES

- 4CH (2022), Case Study 2: Preservation and conservation of Choirokoitia, a Neolithic settlement, Available at: <https://www.4ch-project.eu/case-study-2-preservation-and-conservation-of-choirokoitia-a-neolithic-settlement/> (Accessed on 29/11/2022).
- Barbuti, N. and De Bari, M. (2020), “Digitalizzazione e Patrimonio Culturale Digitale. Ambiguità, ipotesi, definizioni”, *Aida Informazioni. Rivista di Scienze dell'informazione*, 3-4: luglio-dicembre, pp. 15-31.
- Bonacini E. (2011), *Nuove tecnologie per la fruizione e valorizzazione del patrimonio culturale*, Aracne, Roma.
- Cyprus Institute (2017), “Research from CyI’s Virtual Environments Lab Selected Among the Best International Practices of Public Space Co-Creation”, Available at: <https://www.cyi.ac.cy/index.php/in-focus/cyi%E2%80%99s-virtual-environments-lab-research-selected-among-the-best-international-practices-of-public-space-co-creation.html> (Accessed on 29/11/2022).
- Danesh, M.M. and Rajabi, A. (2022), “Importance of Digital Techniques of Documentation for the Conservation of Cultural Heritage”, in Versaci, A., Bougda, H., Akagawa, N., Cavalagli, N. (Eds.) *Conservation of Architectural Heritage. Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham.
- Di Giulio, R. et al. (2019), “ICTs for Accessing, Understanding and Safeguarding Cultural Heritage: The Experience of INCEPTION and ROCK H2020 Projects”, *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 15, n. 6, pp. 825-843.
- European Commission (2011), *Commission Recommendation of 27 October 2011 on the digitisation and online accessibility of cultural material and digital preservation (2011/711/EU)*.
- European Commission (2021), *Commission Recommendation of 10.11.2021 on a common European data space for cultural heritage*.
- EP and the Council of the European Union (2021), *Regulation (EU) 2021/694 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2021 establishing the Digital Europe Programme and repealing Decision (EU) 2015/2240*.
- European Commission (2022), “Recovery and Resilience Scoreboard Thematic analysis. Culture and Creative Industries”, Available at: [https://ec.europa.eu/economy\\_finance/recovery-and-resilience-scoreboard/assets/thematic\\_analysis/scoreboard\\_thematic\\_analysis\\_culture.pdf](https://ec.europa.eu/economy_finance/recovery-and-resilience-scoreboard/assets/thematic_analysis/scoreboard_thematic_analysis_culture.pdf) (Accessed on 29/11/2022).
- Europeana (2020), “Strategy 2020-2025, Empowering Digital Change”, Available at: [https://pro.europeana.eu/files/Europeana\\_Professional/Publications/EU2020StrategyDigital\\_May2020.pdf](https://pro.europeana.eu/files/Europeana_Professional/Publications/EU2020StrategyDigital_May2020.pdf) (Accessed on 05/08/2022).
- Niccolucci, F., Felicetti, A., Hermon, S. (2022), “Populating the Data Space for Cultural Heritage with Heritage Digital Twins”, *Data*, 7, 105.
- Inception (2019), “Demonstration cases, Istituto degli Innocenti, Florence, Italy”, Available at: [https://www.inception-project.eu/en/demonstration\\_cases/istituto-degli-innocenti-florence-italy](https://www.inception-project.eu/en/demonstration_cases/istituto-degli-innocenti-florence-italy) (Accessed on 29/11/2022).
- Maietti, F., Medici, M. and Ferrari, F. (2021), “Un Competence Centre europeo per la conservazione del patrimonio”, *Paesaggio Urbano*, Vol. 2, pp. 91-99.
- Panciroli, C., Macauda, A. and Russo, V. (2017), “Educating about Art by Augmented Reality: New Didactic Mediation Perspectives at School and in Museums”, *Proceedings* 1, 1107.
- Vayanou, M., Chrysanthi, A., Katifori, A. and Antoniou, A. (2020), “Cultural heritage and social experiences in the times of COVID 19”, in 2020 AVI2CH Workshop on Advanced Visual Interfaces and Interactions in Cultural Heritage, AVI2CH 2020.

to the digital transformation and the advanced digitisation process of cultural resources, exploiting the most innovative technologies, and following an interdisciplinary, holistic and collaborative approach among theoretical and practical knowledge, institutions and stakeholders.

As an example of the potential and role entrusted by 4CH to enabling technologies, the project has recently launched the ‘SUM - Save the Ukraine Monuments’ initiative (<https://www.4ch-project.eu/sum-save-the-ukraine-monuments-video-presentation/>), collaborating with other European institutions and cultural organisations to collect the digital documentation of the Ukrainian CH, threatened by the war conflict. Data, contents and resources have been duplicated and temporarily transferred to servers in the European Union, making it possible at

the same time to preserve the memory, valuable documents and information to support future actions of restoration on CH assets at risk.

For the 4CH project, the adoption and development of tools is integrated with the fine tuning of the necessary knowledge, digital databases, procedures, standards and services to support the activities of safeguarding monuments and historical sites, favouring the implementation of initiatives that, as advocated by European policies, could rapidly increase the number, availability and, above all, the quality of digitised resources, to be made available to address global crises that threaten natural and cultural resources.

## ACKNOWLEDGMENTS

The research project “4CH-Competence Centre for the Conservation of Cultural Heritage”, cofounded by the

European Commission under the HORIZON 2020 Framework Programme (G.A. n. 101004468, 1 January 2021 – 31 December 2024) was developed by a Consortium of 19 partners from 12 European countries under the lead of INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare).

<https://www.4ch-project.eu>

Gaia Turchetti, <https://orcid.org/0000-0001-6746-0544>

Dipartimento di Pianificazione, Design e Tecnologia dell'Architettura, Università degli studi di Roma La Sapienza, Italia

gaia.turchetti@uniroma1.it

**Abstract.** L'aggiornamento tecnologico degli ultimi decenni ha permesso, a livello urbano, la definizione di nuovi strumenti per affrontare le problematiche connesse ai cambiamenti climatici. La ricerca si focalizza su metodologie e tecnologie utili per la definizione di nuove classificazioni morfometriche (RLCZ, Rome Local Climate Zone) e la conseguente costruzione di modelli parametrici specifici per il tessuto della città storica, partendo dal caso studio sulla città di Roma. Ciò a supporto di un processo progettuale consapevole e compatibile con le peculiarità di tessuti complessi. La metodologia e gli strumenti proposti, sperimentabili su scenari analoghi o ricalibrati per realtà differenti, possono fornire un ulteriore tassello conoscitivo, in integrazione con le sperimentazioni internazionali in corso.

**Parole chiave:** Local Climate Zone (LCZ); Adaptation and mitigation; Climate change; Historic city; Rome.

## Introduzione

La città è caratterizzata da un mix tra pieni e vuoti relazionati secondo diversi rapporti di densità (Berghauser, Pont *et. al.*, 2010), dove la definizione dello spazio costruito determina e delimita quello aperto e viceversa, in un mutuo rapporto tra percorsi e quinte stradali. La 'tradizionale' dualità pieno/vuoto, tipica di tessuti consolidati, è venuta indubbiamente meno con l'evoluzione moderna dell'idea di città in cui «roads and buildings follow their own dedicated forms» (Marshall, 2005). Le diverse stratificazioni, frutto di piccole e grandi variazioni sintomatiche di mutamenti di cultura, uso e percezione dello spazio, hanno determinato, nel tempo e in maniera più o meno significativa, mutamenti nella conformazione del tessuto urbano, interferendo anche sulla definizione di differenti condizioni climatiche.

Comprendere queste dinamiche e i legami con i fenomeni fisici legati al microclima urbano risulta essere un'operazione estre-

mamente complessa (Di Sabotino, *et al.*, 2010), che si complica maggiormente se ci soffermiamo su tessuti articolati come quelli storici. Proprio questi tessuti, inurbati in complessi organismi edilizi che ne hanno modificato gli equilibri, sono le aree maggiormente vulnerabili dell'intero territorio urbano e dove si registrano i fenomeni di UHI più intensi e un aumento di eventi atmosferici estremi (IPCC, 2022; EC, 2018; Rosenzweig *et al.*, 2018), come emerge chiaramente anche dalle elaborazioni del modello *UrbClim* nell'ambito del *Copernicus Climate Change Service*.

Per comprendere la complessità di questi scenari e poter operare, in una visione olistica, in termini di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici, è pertanto necessario trovare delle possibili strade che aiutino a 'semplificare', da un lato, i dati di partenza - facilitando le operazioni di calcolo- e conservare, dall'altro, quelle variabilità che contraddistinguono la morfologia di ogni singolo tessuto.

Per far fronte a questa necessità di sintesi, diversi filoni di ricerca a livello internazionale si sono indirizzati da decenni verso la parametrizzazione della morfologia urbana, partendo da una domanda di fondo: «Does urban climate research have quantitative guidelines to offer regarding street geometry?» (Oke, 1988).

Certamente, non si ricerca una risposta assoluta o univoca, ma una "geometria compatibile", ovvero una gamma di parametri a cui si può ridurre la realtà; parametri intesi come valori matematici (Rostagni, 2008), che vanno individuati, analizzati e messi in relazione tra loro al fine di definire una migliore qualità dello spazio urbano (Oke, 1988), ottimizzandone il comfort e minimizzandone le cause di discomfort.

## Rome Local Climate Zone (RLCZ): decision-making support tool for the historical city

**Abstract.** Technological upgrading in recent decades has allowed, at the urban level, the definition of new tools to address issues related to climate change. The research focuses on methodologies and technologies that are useful for the definition of new morphometric classifications (RLCZ, Rome Local Climate Zone) and the consequent construction of specific parametric models for the fabric of the historic city, starting from the case study on the city of Rome. This is to support an informed design-making process that is compatible with the peculiarities of complex fabrics. The proposed methodology and tools, which can be tested on similar scenarios or recalibrated for different realities, can provide an additional piece of knowledge, integrated with ongoing international experiments.

**Keywords:** Local Climate Zone (LCZ); Adaptation and mitigation; Climate change; Historic city; Rome.

## Introduction

The city is characterised by a mix of solids and voids related according to different density ratios (Berghauser, Pont *et. al.*, 2010), where the definition of the built space determines and delimits the open space and vice versa, in a mutual relationship between roads and the scenic layouts of streets. The 'traditional' full/empty duality, typical of established fabrics, has undoubtedly failed with the modern evolution of the idea of the city in which «roads and buildings follow their own dedicated forms» (Marshall, 2005). The different stratifications, the result of small and large variations symptomatic of changes in culture, use and perception of space, have determined, over time and in a more or less significant way, changes in the conformation of the urban fabric, also interfering in the definition of different climatic conditions.

Understanding these dynamics and the links with physical phenomena related to the urban microclimate turns out to be an extremely complex operation (Di Sabotino, *et al.*, 2010), which becomes more complicated if we dwell on articulated fabrics such as the historic ones. Precisely, these fabrics, urbanised in complex-built structures that have modified their balances, are the most vulnerable areas of the entire urban territory, where the most intense UHI phenomena and an increase in extreme weather events are recorded (IPCC, 2022; EC, 2018; Rosenzweig *et al.*, 2018), as also evidenced by the elaborations of the *UrbClim* model within the *Copernicus Climate Change Service*.

In order to understand the complexity of these scenarios and to be able to operate, in a holistic view, in terms of climate change adaptation and mitigation

Questa parametrizzazione della forma urbana, nonostante l'esistenza di avanzati sistemi di calcolo computazionale, è ancora estremamente utile per la costruzione di modelli "morfometrici" (o geometrici) (Grimmond and Oke, 1999), in cui lo *street canyon* è l'unità geometrica di base. Questi modelli sono utili non solo per la nuova edificazione ma anche per contesti esistenti, al fine di comprendere ed estrapolare le relazioni tra parametri ambientali e caratteri morfologici, riducendone la complessità alle sole grandezze essenziali: altezza, ampiezza e lunghezza, densità e caratteristiche termo-fisiche, che caratterizzano lo spazio aperto così come quello costruito.

### Dalla Local Climate Zone alla Rome Local climate Zone

Un utile punto di partenza nei processi di parametrizzazione del tessuto urbano sono le classificazioni morfometriche *climate-based*, ovvero classificazioni che mettono in relazione la forma urbana con differenti parametri climatici, per la comprensione dei fenomeni di UHI. Dagli iniziali studi condotti da Chandler, negli anni Settanta del XX secolo, a quelli di Auer per la città di San Louis (USA) e poi di Ellefsen (decisivi per la definizione dei moderni indirizzi), si è arrivati nel 2004 alle rielaborazioni di T.R. Oke, che ridefinì una nuova classificazione con l'iniziale finalità di migliorare la localizzazione di stazioni meteorologiche urbane, affinché la strumentazione potesse meglio registrare le differenti condizioni climatiche. La classificazione di Oke, pubblicata nel 2006 nel bollettino del WMO, consta di 7 classi, definite "Urban Climate Zone" (UCZ), delle quali individua *aspect ratio*, classe di

tion, it is, therefore, necessary to find possible ways that help to 'simplify', on the one hand, the source data – facilitating computational operations – and to preserve, on the other hand, those variabilities that distinguish the morphology of each individual fabric. To address this need for synthesis, several international lines of research have for decades been directed toward the parameterisation of urban morphology, starting with a basic question, «Does urban climate research have quantitative guidelines to offer regarding street geometry?» (Oke, 1988). Certainly, neither an absolute nor an unambiguous answer is sought, but a "compatible geometry" that is, a range of parameters to which reality can be reduced; parameters understood as numerically expressible measures (Rostagni, 2008), which must be identified, analysed and related to each

### L'importanza delle classificazioni morfometriche climate-based

other in order to define a better quality of urban space (Oke, 1988), optimising its comfort and minimising the causes of discomfort.

This parameterisation of urban form, despite the existence of advanced computational systems, is still extremely useful for building "morphometric" (or geometric) models (Grimmond and Oke, 1999) in which the *street canyon* is the basic geometry unit. These models are useful not only for new constructions but also for existing contexts, in order to understand and extrapolate the relationships between environmental parameters and morphological characters, reducing complexity to the essential quantities: height, width and length, density and thermo-physical characteristics, which characterise open as well as built space.

rugosità e permeabilità dei suoli (Oke, 2006). Queste sette classi descrivono 7 differenti aree della città: dalle aree più densamente edificate ad aree semi rurali. Agli studi di Oke ne sono seguiti altri che ne hanno perfezionato o modificato la struttura. Il più significativo è quello proposto da I. D. Stewart, nella sua tesi dottorale del 2011. Il lavoro, supportato dallo stesso Oke, ha portato all'elaborazione di 17 classi definite "Local Climate Zone" (LCZ) strettamente relazionate, come si evince dal nome, alla scala di indagine locale: 10 riferite all'area edificata della città (*building types*) e 7 riferite all'uso dei suoli (*Land cover types*), con alcune precisazioni su aree industriali e stagionalità dei terreni liberi. Per ciascuna classe o zona vengono definiti specifici valori dimensionali e indicazioni sulle caratteristiche termo-fisiche generali (Tab. 1) (Stewart and Oke, 2012).

Queste classificazioni consentono una rapida lettura di specifiche realtà urbane e sono di estrema utilità per la definizione di modelli morfometrici di base, come dimostra, ad esempio, il progetto Wudapt (World Urban Database and Access Portal Tools). Ogni tipo di LCZ, associata a una serie di variabili di forma e funzione, può fornire indicazioni per la costruzione di modelli utili non solo per lo studio dell'isola di calore ma, più in generale, del comfort urbano e sono un elemento di partenza per la definizione di una mappatura standardizzata, base comune per una condivisione di informazioni. (Demuzere, Bechtel, et al., 2019; Ching, Mills, et al., 2018; Mills, Bechtel, et al., 2017).

### Le classificazioni morfometriche climate-based per la città storica: il caso di Roma

La classificazione morfometrica LCZ, così come definita da Oke ed il suo team, fotografa una realtà urbana d'oltreoceano, ca-

### From Local Climate Zone to Rome Local climate Zone

#### The importance of climate-based morphometric classifications

A useful starting point in urban fabric parameterisation processes are *climate-based* morphometric classifications, that is, classifications that relate the urban form to different climatic parameters to understand UHI phenomena. From the initial studies conducted by Chandler, in the 1970s, to those of Auer for the city of St. Louis (USA), and then by Ellefsen (decisive in the definition of modern addresses), in 2004 we reach the reworkings of T.R. Oke, who redefined a new classification with the initial purpose of improving the location of urban weather stations so that instrumentation could better record different climatic conditions. Oke's classification, published in 2006

in the WMO Bulletin, consists of 7 classes, termed "Urban Climate Zone" (UCZ), of which he identifies *aspect ratio*, roughness class and permeability of soils (Oke, 2006). These seven classes describe 7 different areas of the city, from the most densely built-up areas to semi-rural areas. Oke's studies were followed by others that refined or modified the structure. The most significant is the one proposed by I. D. Stewart in his 2011 doctoral dissertation. The work, supported by Oke himself, led to the definition of 17 classes called "Local Climate Zone" (LCZ) closely related, as the name implies, to the scale of local investigation: 10 referring to the built-up area of the city (*building types*) and 7 referring to land use (*land cover types*), with some specifications on industrial areas and seasonality of vacant land. Specific dimensional values and in-

Tab. 01 | UCZ e LCZ a confronto: 1 description; 2 roughness class; 3 H/W; 4 % impermeabile/ Impervious surface fraction; 5 SVF; 6 Building surface fraction; 7 Pervious surface fraction; 8 Height of roughness elements, 9 Terrain roughness class. Rielaborazione G.Turchetti

UCZ and LCZ compared: 1 description; 2 roughness class; 3 H/W; 4 % impermeabile/ Impervious surface fraction; 5 SVF; 6 Building surface fraction; 7 Pervious surface fraction; 8 Height of roughness elements, 9 Terrain roughness class. Re-elaboration G.Turchetti

UCZ Urban climate zone					LCZ Local climate zone		Tab. 01						
	description	roughness class (1)	H/W	% waterproof		description	SVF (2)	H/W	Building surface fraction (3)	Impervious surface fraction (4)	Pervious surface fraction (4)	Height of roughness elements (5)	Terrain roughness class (1)
1	intensively urbanised area with separate, closely spaced, high-rise buildings with cladding (e.g. city centre with skyscrapers)	8	>2	>90	1	Compact high-rise: Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	0.2-0.4	> 2	40-60	40-60	< 10	> 25	8
2	intensively and very densely urbanised area, with 2-5 storey buildings, contiguous or very closely spaced, often of brick or stone (e.g. historic centre)	7	1.0-2.5	>85	2	Compact midrise: Dense mix of midrise buildings (3-9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	0.3-0.6	0.75-2	40-70	30-50	< 20	10-25	6-7
3	highly urbanised, medium-density area, with buildings in a row or separate, but still close together (e.g. residential area)	7	0.5-1.5	70-85	3	Compact low-rise: Dense mix of low-rise buildings (1-3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	0.2-0.6	0.75-1.5	40-70	20-50	< 30	3-10	6
4	highly urbanised area, medium or low density, with large, low-rise buildings and paved car parks (e.g. commercial area)	5	0.05-0.2	70-95	4	Open high-rise: Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	0.5-0.7	0.75-1.25	20-40	30-40	30-40	>25	7-8
5	medium-developed, low-density suburban area with one- or two-storey houses (e.g. suburban residential areas)	6	0.2-0.6 (>1 se if with trees)	35-65	5	Open midrise: Open arrangement of midrise buildings (3-9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	0.5-0.8	0.3-0.75	20-40	30-50	20-40	10-25	5-6
6	mixed-use areas, with large buildings surrounded by large undeveloped areas (e.g. hospitals, airports)	5	0.1-0.5, it depends on the trees	<40	6	Open low-rise: Open arrangement of low-rise buildings (1-3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	0.6-0.9	0.3-0.75	20-40	20-50	30-60	3-10	5-6
7	semi-rural areas, with scattered houses in a natural or agricultural area (e.g. farms)	4	>0.05, it depends on the trees	<10	7	Lightweight low-rise: Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	0.2-0.5	1-2	60-90	< 20	<30	2-4	4-5
Notes:					8	Large low-rise: Open arrangement of large low-rise buildings (1-3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	>0.7	0.1-0.3	30-50	40-50	<20	3-10	5
(1) The roughness height is set where the air velocity should theoretically be zero. Roughness values are given per terrain class (class 7: densely built-up area with no major variations in the height of buildings).					9	Sparingly built: Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	>0.8	0.1-0.25	10-20	< 20	60-80	3-10	5-6
(2) Sky View Factor is a parameter expressing the ratio between the radiation received (or emitted) by a flat surface and that received (or emitted) by the entire hemisphere.					10	Heavy industry: Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	0.6-0.9	0.2-0.5	20-30	20-40	40-50	5-15	5-6

Fabric	PRG Codes	Project codes	
of medieval origin	T1	A	A1
of Renaissance and modern pre-unification expansion	T2		A2
of 19th-twentieth-century urban restructuring	T3	B	B1
nineteenth-twentieth-century expansion by blocks	T4		B2
nineteenth-twentieth-century expansion to point building lots	T5		B3

ratterizzata da canyon prevalentemente rettilinei, da una forte verticalità e alta densità dell'edificato, etc. L'immagine che ci viene restituita è molto distante da quella della città europea e primariamente italiana. Sebbene, pertanto, sia interessante perseguire un linguaggio comune e condiviso volto alla standardizzazione delle analisi, nella ricerca qui presentata si vuole proporre un differente approccio al tema, calibrando e ridefinendo le classificazioni di partenza in base alle specificità del tessuto urbano oggetto di studio: la città storica italiana.

Partendo da questo presupposto, una prima fase del lavoro ha previsto la comparazione delle caratteristiche morfometriche dei tessuti descritti nelle LCZ con le caratteristiche dei tessuti della città italiana.

La LCZ 2 descrive la città storica come «zona intensamente e molto densamente urbanizzata, con edifici a 2-5 piani, contigui o molto ravvicinati, spesso di mattoni o pietra (es. centro storico)» (Tab. 1). Se analizziamo, però, nel dettaglio i singoli rapporti dimensionali di questa specifica categoria, essi risultano essere talmente ampi da accomunare tessuti che, pur facendo parte della città storica, presentano caratteristiche spaziali molto differenti.

Prendendo come caso studio la città storica di Roma, sono stati, quindi, selezionati oltre 40 differenti brani di tessuto costituenti

la città storica (come perimetrata nel PRG) (Tab. 2) e, partendo dall'analisi di questi tessuti, si è proceduto a:

- selezionare i parametri delle LCZ compatibili con le specificità dei tessuti analizzati;
- elaborare nuovi parametri morfometrici, caratterizzanti le realtà oggetto di studio.

Per ogni tipologia di tessuto sono stati rilevati, attraverso televolamento e indagini sul campo, dati dimensionali e proprietà termo-fisiche generali che sono confluiti in specifiche schede, base della nuova classificazione morfometrica proposta. Le schede (Fig. 1) riportano le elaborazioni relative alle seguenti voci: tipo di tessuto, descrizione, classificazione del tessuto da PRG, schema del canyon di riferimento, classe di rugosità, rapporto H/W, rapporto L/H, SVF, rapporto di copertura, permeabilità dei suoli.

Comparando i valori estratti dall'analisi con quelli provenienti delle classificazioni esistenti, è stato possibile valutarne le discordanze e ridefinire alcuni valori soglia che meglio rappresentano le specificità del tessuto storico esaminato. Le principali discordanze emerse sono relative all'*aspect ratio* dei canyon urbani, ovvero ai rapporti dimensionali che caratterizzano la sezione trasversale e longitudinale dei canyon. Il Rapporto H/W (ovvero altezza del fronte costruito/larghezza della sede stradale) solitamente classificato in *Regular* (per i canyon con

dications of general thermo-physical characteristics are defined for each class or zone (Tab. 1). (Stewart and Oke, 2012).

These classifications allow for a quick reading of specific urban realities and are extremely useful for establishing basic morphometric models, as demonstrated, for example, by the Wudapt (World Urban Database and Access Portal Tools) project. Each type of LCZ, associated with a set of shape and function variables, can provide insights for the construction of models that are useful not only for the study of the heat island but, more generally, of urban comfort, and are a starting point for the definition of standardised mapping, a common basis for information sharing. (Demuzere *et al.*, 2019; Ching *et al.*, 2018; Mills *et al.*, 2017).

*Climate-based morphometric classifications for the historic city: the case of Rome*

The LCZ morphometric classification, as defined by Oke and his team, photographs an overseas urban reality, characterised by predominantly rectilinear canyons, strong verticality and high density of the built-up area, etc. The image we get is very distant from that of the European and primarily Italian city. Hence, although it is interesting to pursue a common and shared language aimed at standardising analysis, in the research presented here we want to propose a different approach to the topic by calibrating and redefining the starting classifications according to the specificities of the urban fabric under study: the Italian historic city. Starting from this assumption, a first phase of the work involved comparing the morphometric characteristics of

the fabrics described in the LCZs with the characteristics of the fabrics of the Italian city.

LCZ 2 describes the historic city as an «intensely and very densely urbanized area, with 2-5 story buildings, contiguous or very close together, often of brick or stone (e.g. historic center)» (Tab. 1). However, if we analyse the individual size ratios of this specific category in detail, they turn out to be so broad that they put together fabrics which, although part of the historic city, have very different spatial characteristics.

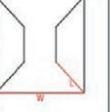
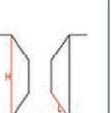
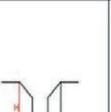
Taking the historic city of Rome as a case study, more than 40 different pieces of fabric constituting the historic city (as per the perimeter in the PRG) were, therefore, selected (Tab. 2) and, starting by analysing them, we proceeded to:

- select LCZ parameters compatible with the specificities of the tissues analysed;

- develop new morphometric parameters, characterising the realities under study.

For each type of fabric, dimensional data and general thermo-physical properties were collected through remote sensing and field surveys, which were incorporated into specific sheets, the basis of the proposed new morphometric classification. The sheets (Fig. 1) report the elaborations for the following items: fabric type, description, fabric classification from PRG, reference canyon pattern, roughness class, H/W ratio, L/H ratio, SVF, cover ratio, and soil permeability.

By comparing the values extracted from the analysis with those coming from the existing classifications, it was possible to assess their discordances and to redefine some threshold values, which better represent the specificities of the historic fabric examined.

Tipi di tessuto	Descrizione	C. PRG	Area di intervento	Schema canyon dell'area di intervento	Classe di rugosità	H/W	L/H	SVF	Rapporto di copertura*	% Imp.			
T1(A)	Via della Fontanella Borghese. Tra via di Monte D'oro e via del Corso.		41°54'14" N 12°28'39" E		7	2,1	8,4	0,2-0,3	0,60	85-95			
	<b>Tipi di tessuto</b>	<b>Descrizione</b>	<b>C. PRG</b>	<b>Area di intervento</b>	<b>Schema canyon dell'area di intervento</b>	<b>Classe di rugosità</b>	<b>H/W</b>	<b>L/H</b>	<b>SVF</b>	<b>Rapporto di copertura</b>	<b>% Imp.</b>		
	T2(A)	Via Frattina. Tra via Belsiana e via Mario de' Fiori.		41°54'14,33" N 12°28'49,30" E		7	2,68	9,51	0,2-0,4	0,72	85-90		
	<b>Tipi di tessuto</b>	<b>Descrizione</b>	<b>C. PRG</b>	<b>Area di intervento</b>	<b>Schema canyon dell'area di intervento</b>	<b>Classe di rugosità</b>	<b>H/W</b>	<b>L/H</b>	<b>SVF</b>	<b>Rapporto di copertura</b>	<b>% Imp.</b>		
	T3(B)	Via Arenula. Tra Lungolivere de' Cenci e via C.		41°53'32,14" N 12°28'28,85" E		7	1,03	2	0,2-0,4	0,58	80-85		
T1(A)	Via dell'Aniene. Tra Lanzone e via de' S.												
	T2(A)	Via Merulana. Tra via Merulana e via via											
		T3(B)	Via de' S. e via C.										
		T4(B)	Via Sicilia. Tra via Pivio e via Lucania.		41°54'38" N 12°29'49" E								
			Type of fabric	Description	C-PRG	Intervention area	Canyon layout of the intervention area	Roughness class	H/W	L/W	SVF	Coverage ratio	% waterpr
			T5(B)	Via Pompeo Magno. Tra via Marcantonio Colonna e via Alessandro Farnese.		41°54'36,02" N 12°28'01,58" E		6	0,85	0,97		0,43	70-75
													
			T5(B)	Via Giovanni Paisiello. Tra via Niccolò Porpora e via Claudio Monteverdi.		41°55'03,09" N 12°29'37,07" E		6	1,11	1,47		0,40	70-75
													
			T5(B)	Via di Villa Patrizi. Tra via Gabriele Fallopio e Piazza Galeno.		41°54'35,28" N 12°30'26,55" E		6	0,96	3,4		0,26	70-75
													
T1(A)	Piazza												
	Legenda C. PRG	Classifica											
		Test											
	Legenda C. PRG	Classifica											
		Test											
	T1(A)	Via Puglie. Tra via Sicilia											

The main discordances that emerged are related to the *aspect ratio* of urban canyons, that is, the dimensional ratios that characterise the cross-sectional and longitudinal sections of canyons. The H/W Ratio (that is, height of the built frontage/width of the roadway), usually classified as *Regular* (for canyons with *aspect ratio*  $\approx 1$ ); *Avenue* ( $< 0.5$ ) and *Deep canyon* ( $\approx 2$ ), in the case study analysed presents values that exceed the threshold reported to us by the literature. Taking into consideration the analysed fabrics, and specifically those of "medieval origin", these are characterised by extremely narrow streets overlooked by buildings even of 4-6 stories (or with different inter-story levels). To bring this specificity back into the classification, it was decided to increase the scale with the H/W value  $> 4$ , defined as *More Deep canyon* (Tab. 3).

Describing the longitudinal section of the canyons, however, a difference in the minimum threshold values emerged. As a common practice, in the L/H ratio (canyon length/frontage height), length (L) is considered as «[...] the road distance between two major intersections subdividing the street canyon, into short ( $L/H=3$ ), medium ( $L/H=5$ ) and long ( $L/H=7$ )» (Ahmad *et al.*, 2005). Reading this definition in relation to the historical fabric once again, it was decided to consider as 'major intersections' (binding the value of the L factor) both intersections with wider urban roads (compared to the average of the analysed urban space), and the presence of wider areas or dilations in the path. Such conditions determine a variation in the aspect ratio of the urban space itself and, consequently, a different behaviour primarily of the

anemometric and radiative factor. In fact, the L/H ratios that can be recorded are different, for example, in a point allotment fabric versus a small block fabric. This clarification always responds to the rationale of standardising the definitions that the literature brings back to us – mainly suited to describe fabrics that in most cases are extremely regular – to the typicality of the historical fabric analysed. Therefore, even for the definition of the L/H ratio it was appropriate to redefine the minimum threshold by introducing the *More Short canyon*, that is, with  $L/H=1-2$  (Tab. 3).

This process of analysis and reworking, therefore, led to the definition of specific LCZs for the fabric of Rome, which in the context of this research were defined as Rome Local Climate Zone, or RLCZ (Tab. 4).

#### The RLCZ as a basis for building simplified models

The definition of a *climate-based* morphometric classification specific to the historical city presented here is part of the objective of defining expeditious tools that can provide input data for morphometric models incorporating *urban canopy* parameters in their formulations. The purpose is to evaluate, even for complex fabrics such as historical ones, possible urban redevelopment scenarios with a view to adaptation and mitigation to climate change. Thus, starting from the RLCZ, geometric models were defined, whose mesh respects the proposed proportions for each class, starting from average values among those recorded (Tab. 5).

The utility of models constructed in this way lies in proposing a simplified computational tool that, based on regularisation and normalisation

Tab. 03 | Nuovi valori soglia della classificazione proposta. Elaborazioni G.Turchetti  
New threshold values of the proposed classification. G.Turchetti elaborations

Tab. 03 |

Dimensional ratios urban canyon historic city			
H/W		L/H	
value	definition	value	definition
~0,5	shallow	1-2	more short
~1	uniform	~3	short
2-4	deep	~5	medium
> 4	more deep	~7	long

*aspec ratio*  $\approx 1$ ); *Avenue* ( $< 0.5$ ) e *Deep canyon* ( $\approx 2$ ), nel caso studio analizzato presenta valori che eccedono la soglia che la letteratura ci riporta. Prendendo in esame i tessuti analizzati, e nello specifico quelli di “origine medievale”, questi sono caratterizzati da strade estremamente strette su cui si affacciano edifici anche di 4/6 piani (o con diverso livello interpiano). Per riportare questa specificità nella classificazione si è deciso di incrementare la scala con il valore  $H/W > 4$ , definito come *More Deep canyon* (Tab. 3).

Descrivendo la sezione longitudinale dei canyon, invece, è emersa una differenza nei valori minimi di soglia. Come prassi

comune, nel rapporto  $L/H$  (lunghezza del canyon/altezza dei fronti) si considera la lunghezza ( $L$ ) come «[...] the road distance between two major intersections subdividing/the street canyon, into *short* ( $L/H=3$ ), *medium* ( $L/H = 5$ ) and *long* ( $L/H=7$ )». (Ahmad et al. 2005:700). Rileggendo questa definizione in relazione al tessuto storico, si è scelto di considerare come ‘maggiori intersezioni’ (che delimitano il valore del fattore  $L$ ) sia gli incroci con le arterie urbane di maggiore ampiezza (rispetto alla media dell’invaso analizzato), sia la presenza di slarghi o dilatazioni del percorso, condizioni queste che determinano una variazione dell’*aspect ratio* dell’invaso stesso e di conseguenza

Tab. 04 | Rome Local Climate Zone RLCZ: la nuova classificazione proposta. Elaborazione G.Turchetti  
Rome Local Climate Zone RLCZ: the proposed new classification. Elaboration G.Turchetti

Tab. 04 |

Rome Local Climate Zone RLCZ									
Type of fabric		description	Fabric classification by PRG	roughness class	H/W*	L/H	SVF	Coverage ratio (Sc/Sf)	% waterpr.
A	A1	intensively and very densely urbanised area, with 2-5 storey buildings, contiguous or very closely spaced, often of brick or stone (e.g. historic centre)	of predominantly medieval origin	7	deep more deep 2,83 (5,9-0,5)	medium $L/H= 5,4$ (8,4-3,3)	0,2-0,4 Più vicino al valore + basso	0,63	95-85
	A2		of predominantly Renaissance origin		deep	long $L/H=7,2$		0,72	85-90
B	B1	intensively and very densely urbanised area, with 5-9 storey buildings, contiguous or very close together, often of reinforced concrete or mixed (expansion)	of urban restructuring 8-900	7	uniform	short $L/H=2,3$	0,3-0,4 Più vicino al valore + alto	0,47	80-85
	B2		of expansion 8-900 block		uniform	short $L/H=3,2$		0,46	80-90
	B3	Medium urbanised area with buildings not very close together.	of expansion 8-900 point allotment		uniform	short $L/H=1,9$	>0,5	0,36	70-75

\* The value reported is the average of the values recorded in the sample tissues. Maximum and minimum values are indicated in round brackets

Tab. 05 | Caratteristiche della maglia dei modelli geometrici proposti per i tessuti di tipo A1 e B2. Elaborazione G.Turchetti  
*Mesh characteristics of the proposed geometric patterns for A1 and B2 type fabrics. Elaboration G.Turchetti*

scenario 1	
fabric A1	
<i>description</i>	
fabrics of medieval origin	
<i>building characterization</i>	
H m buildings	16,4
<i>characterization of the street</i>	
W m vie	5,1
Lm vie	88,6
<i>dimensional ratios</i>	
H/W	3,2 deep
L/H	5,4 medium
<i>square characterization</i>	
Wm squares	43
cop. ratio	0,75

scenario 4	
fabric B2	
<i>description</i>	
nineteenth- and twentieth-century expansion fabrics for a block	
<i>building characterization</i>	
Hm buildings	21,2
<i>characterization of the street</i>	
W m vie	15,1
Lm vie	68,9
<i>dimensional ratios</i>	
H/W	1,4 uniform
L/H	3,25 short
<i>square characterization</i>	
Lm squares	53,4
cop. ratio	0,57

| Tab. 05

### **Real dimensional ratios compared**

real dimensional ratios compared (average value)	
H/W	3,8 deep
L/H	5,4 medium
average coverage ratio*	0,64

real dimensional ratios compared (average value)	
H/W	1,41 uniform
L/H	3,2 short
average coverage ratio*	0,45

\* The coverage ratio is evaluated on a 100mx100m portion of the fabric.

of the urban fabric, can help to test different intervention scenarios in an expeditious manner. The validity of this simplification lies in providing the planner – with a certain approximation determined by the incidence of the morphological factor, which can, in any case, be evaluated in subsequent levels of in-depth study – with an indicative value of expected improvement for each scenario. This allows an initial assessment of the process to be undertaken in a reasonably short time.

### **Conclusions**

The desire to talk about a specific urban setting, characterised by a temporal overlap and stratification to be

protected and enhanced, depended on having found how, in the scientific field, we often talk about cities but little about the peculiarities of the urban fabrics that characterise them. This choice entailed the need to recalibrate and sometimes rethink the tools of knowledge and calculation to adapt them to the complexity of the existing situation analysed. In the consolidated city, and even more so in the complex urban mesh of the historic city, the possibilities for action are undoubtedly more limited. However, correct knowledge of the climatic datum can play an interesting role in the operations of 'mending' the urban fabric, leading, if analysed in synergy with the other competing

factors, to an improvement with a view to adaptation and mitigation to climate change. Methodologies and tools provided are, therefore, conceived as a useful building block to facilitate a comparative reading between morphological, morphometric and environmental aspects, helping to locate critical points on which to carry out subsequent detailed investigations, and providing design directions that integrate a mitigation and adaptation rationale in the early stages of planning and design, with operational repercussions that primarily concern the planner alongside the administration in their key roles at the local level. The proposed classifications and mod-

els, although built specifically on the fabric of the historic city of Rome, are designed to be adaptable to urban realities with similar *aspect ratios*. The replicability of the methodology followed (from the direct analysis of the fabrics, to the definition of new morphometric classes, to the definition of computational models) may lead, over time, to define classifications and models increasingly responsive to the peculiarities of historical fabrics that are even very different from each other. The aim is to establish processes that are increasingly 'compatible' with the specificities of the existing situation, starting from this first piece of knowledge integrated with ongoing international experiments.

un differente comportamento primariamente del fattore anemometrico e radiativo. Differenti infatti sono i rapporti L/H registrabili, ad esempio, in un tessuto a lottizzazione puntiforme rispetto a quello a piccolo isolato. Tale precisazione risponde sempre alla logica di uniformare le definizioni che la letteratura ci riporta – adatte prevalentemente a descrivere tessuti che nella maggior parte dei casi si presentano estremamente regolari – alla tipicità del tessuto storico analizzato. Pertanto, anche per la definizione del rapporto L/H è stato opportuno ridefinire la soglia minima introducendo il *More Short canyon*, ovvero con  $L/H = 1-2$  (Tab. 3).

Questo processo di analisi e rielaborazione ha portato, quindi, alla definizione di LCZ specifiche per il tessuto di Roma, che nell'ambito di questa ricerca sono state definite come *Rome Local Climate Zone*, ovvero RLCZ (Tab. 4).

#### *La RLCZ come base per la costruzione di modelli semplificati*

La definizione di una classificazione morfometrica *climate-based* specifica per la città storica qui presentata, rientra nell'obiettivo di definire strumenti speditivi che possano fornire dati di input per modelli morfometrici che incorporino i parametri della *urban canopy* nelle loro formulazioni, al fine di valutare, anche per tessuti complessi come quelli storici, possibili scenari di riqualificazione urbana in ottica di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici.

Partendo quindi dalla RLCZ, sono stati definiti modelli geometrici la cui maglia rispetta le proporzioni proposte per ciascuna classe, partendo da valori medi tra quelli registrati (Tab. 5). L'utilità di modelli così costruiti è nel proporre uno strumento di calcolo semplificato che, basandosi su una regolarizzazione e

normalizzazione del tessuto urbano, possa aiutare a testare in maniera speditiva diversi scenari di intervento. La validità di questa semplificazione consta nel fornire al progettista – con una certa approssimazione determinata dell'incidenza del fattore morfologico che potrà comunque essere valutato nei successivi livelli di approfondimento – un valore orientativo di miglioramento atteso per ciascuno scenario, che consenta, in tempi ragionevolmente brevi, una iniziale valutazione sul processo da intraprendere.

#### **Conclusioni**

La volontà di parlare di uno specifico ambito urbano, caratterizzato da una sovrapposizione e stratificazione temporale da tutelare e valorizzare, è dipesa dall'aver riscontrato come, in campo scientifico, si parli spesso di città ma poco delle peculiarità dei tessuti urbani che la caratterizzano. Questa scelta ha comportato la necessità di ricalibrare e a volte ripensare gli strumenti di conoscenza e calcolo per adattarli alla complessità dell'esistente analizzato. Nella città consolidata, ed ancor di più nella complessa maglia urbana della città storica, le possibilità di azione sono indubbiamente più limitate, eppure nelle operazioni di 'rammendo' del tessuto urbano la corretta conoscenza del dato climatico può rivestire un ruolo interessante, portando, se analizzata in sinergia con gli altri fattori concorrenti, ad un miglioramento in un'ottica di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici.

Metodologie e strumenti forniti sono quindi pensati come un tassello utile per facilitare una lettura comparata tra aspetti morfologici, morfometrici e ambientali, aiutando nella localizzazione dei punti critici, sui quali effettuare successive indagini di dettaglio, e fornendo indirizzi progettuali che integrino logi-

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This paper presents some in-depth studies carried out by the author, a Research Fellow at the Dept. of Planning, Design and Technology of Architecture, Sapienza University, Rome. These studies originate from the results of doctoral research conducted in collaboration with the CNR-IDASC Institute of Acoustics and Sensors "Orso Mario Corbino", which is now the focus of further developments.

che di mitigazione e adattamento nelle prime fasi di programmazione e progettazione, con ricadute operative che riguardano primariamente il progettista accanto all'amministrazione nei loro ruoli chiave a livello locale.

Le classificazioni e i modelli proposti, sebbene costruiti specificatamente sul tessuto della città storica di Roma, sono pensati per essere adattabili a realtà urbane che presentano analoghi rapporti di *aspect ratio*. La replicabilità della metodologia seguita (dall'analisi diretta dei tessuti, alla definizione di nuove classi morfometriche, alla definizione di modelli di calcolo) potrà portare, nel tempo, a definire classificazioni e modelli sempre più rispondenti alle peculiarità di tessuti storici anche molto differenti tra loro, con l'obiettivo di instaurare processi sempre più 'compatibili' con le specificità dell'esistente, partendo da questo primo tassello conoscitivo in integrazione con le sperimentazioni internazionali in corso.

#### RINGRAZIAMENTI

Il presente contributo presenta alcuni approfondimenti condotti dall'autore, Assegnista di ricerca presso il Dip. di Pianificazione, Design e Tecnologia dell'architettura della Sapienza Università di Roma, che nascono da risultati della ricerca dottorale condotta in collaborazione con il CNR-IDASC Istituto di Acustica e Sensoristica "Orso Mario Corbino" e ad oggi oggetto di successivi sviluppi.

#### REFERENCES

- Ahmad, K., Khare, M., Chaudhry, K.K. (2005), "Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections – a review," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 93, pp. 697-717.
- Berghauser Pont, M., Haupt, P. (2010), *Spacematrix: Space, Density and Urban Form*, NAI Publisher, Rotterdam.
- Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., et al. (2018), "WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthro-
- pocene", in *Bull Am Meteorol Soc*, Vol. 99, n. 9, pp. 1907-1924.
- Demuzere, M., Bechtel, B., Mills, G. (2019), "Global transferability of local climate zone models", *Urban Climate*, Vol. 27, pp. 46-63.
- Di Sabotino, Leo, L.S., Cataldo, R., Ratti, F.C., Britter, R.E. (2010), "Construction of Digital Elevation Models for a Southern European City and a Comparative Morphological Analysis with Respect to Northern European and North American Cities", *Bull Am Meteorol Soc*, Vol. 49, pp. 1377-1396.
- EC (2018), *Urban Atlas-copernicus*, Available at: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2018>.
- Grimmond, C.S.B., Oke, T.R. (1999), "Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form", *J Appl Meteorol Climatol*, Vol. 38, pp. 1262-1292.
- IPCC (2022), *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. The Working Group II, Intergovernmental Panel on Climate Change*, Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- Marshall, S. (2005), *Streets & patterns*, SponPress Taylor & Francis Group, London.
- Mills, Bechtel, Foley, Ching, See, Feddema (2017), "The WUDAPT Project: Status of Database and Portal Tools", 13th Symp. of the Urban Environment, Seattle, WA, *Amer. Meteor. Soc.*, 9.1.
- Oke T.R. (1988), "Street Design and Urban Canopy Layer Climate", *Energy and Buildings*, Vol. 11, pp. 103-113.
- Oke T.R. (2006), "Initial guidance to obtain representative meteorological obseration at urban scale", *World Metereological Organization*, Vol. 81.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., et al. (2018), "Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network: Summary for City Leaders" in C. Rosenzweig, W. Solecki, P. Romero-Lankao, et al. (Eds.), *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, Xvii-Xlii. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rostagni (2008), *Luigi Moretti 1907-1973*, Electa, Milano.
- Stewart, I.D., Oke, T.R. (2012), "Local climate zones for urban temperature studies", *Bull Am Meteorol Soc*, Vol. 93, n. 12, pp. 1879-1900.

# La tecnologia come interfaccia abilitante negli spazi di transizione per lo *smart Heritage*

RICERCA E  
Sperimentazione/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION

Marta Calzolari, <https://orcid.org/0000-0002-9749-7214>  
Valentina Frighi, <https://orcid.org/0000-0002-9082-8746>  
Valentina Modugno, <https://orcid.org/0000-0001-5867-8824>  
Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara, Italia

marta.calzolari@unife.it  
valentina.frighi@unife.it  
valentina.modugno@unife.it

**Abstract.** L'attuale e sempre più frequente deriva tecnocratica riconosce un potere indiscriminato a tecniche e tecnologie nella risoluzione di numerose problematiche, tra cui la battaglia al cambiamento climatico e al suo impatto sulle città. Una delle sfide future riguarda l'applicazione efficace e consapevole di *Key Enabling Technologies* (KETs) per la creazione di *smart environment* nel patrimonio storico, detentore di un ruolo strategico, oltre che per i valori conservativi, anche nella più ampia strategia per limitare le emissioni di gas serra climateranti. Il contributo qui proposto riporta alcuni risultati preliminari di una ricerca volta a indagare e riconoscere a tali tecnologie un possibile ruolo di medium abilitante per intraprendere scelte deterministiche più consapevoli nel campo del *Cultural Heritage* (CH).

**Parole chiave:** Smart Heritage; Liminal spaces; Smart sensors' systems; eHeritage; Heritage-plus.

## Premessa

Il tempo di oggi ha visto un potenziamento del ruolo di scienza e tecnica in ogni ambito della vita quotidiana, riconoscendo il "dominio" delle tecnologie nella risoluzione di problemi di qualsiasi genere, capaci addirittura di soverchiare il cosiddetto "sapere tecnico". Tuttavia, ciò avviene sovente senza una gestione appropriata e consapevole di tali strumenti, specie nel settore delle costruzioni, da sempre e per sua intrinseca natura reticente nei confronti dell'innovazione, rischiando di tramutarsi in una deriva tecnocratica.

Per contro, le capacità abilitanti delle nuove tecnologie offrono la possibilità concreta di affiancare all'ineludibile approccio critico ed euristico proprio del progettista, il rigore scientifico di tali strumenti, abilitando nuove capacità.

Il termine "abilitante" si rifa, seppure con un'adeguata visione critico-reinterpretativa, al concetto di *Key Enabling Technolo-*

*gies* (KETs). Nell'oramai lontano 2009, la Commissione Europea definì le KETs come tecnologie nuove e complesse capaci di migliorare e innovare prodotti e processi in ogni settore industriale, originando vantaggi sul fronte della ricerca scientifica, su quello industriale e occupazionale e in termini di miglioramento delle condizioni di vita (COM, 2009).

Nel contesto italiano, anche il PNRR pone l'attenzione sull'importanza delle KETs come strumento essenziale per l'avanzamento delle competenze, specificando che queste debbano includere, tra le altre: simulazione avanzata e analisi e gestione dei big data; tecnologie avanzate per l'ambiente e l'energia; mobilità sostenibile; tecnologie applicate e patrimonio culturale; tecnologie per la biodiversità e la sostenibilità ambientale; tecnologie per la transizione digitale industriale e Industria 4.0.

Nel settore delle costruzioni, l'adozione delle KETs può avvenire con diverse finalità ed obiettivi, più facilmente legati alla nuova costruzione. Tuttavia, per quanto riguarda la valorizzazione del costruito, in particolare storico, tale dominio è ancora scarsamente esplorato, seppur i piani strategici per gli anni a venire evidenzino la necessità di intervenire per la sua conservazione e valorizzazione anche in questa chiave.

Solo l'Italia, infatti, possiede il 4,7% del patrimonio edilizio storico mondiale (Galatioto *et al.*, 2017) pari a circa il 46% dell'intero paese (UNESCO, 2019); in Europa, una quota compresa tra il 24 e il 35% del patrimonio esistente è costituita da edifici storici ed è responsabile del 27-42% dei consumi finali dell'intero paese (Blumberga *et al.*, 2019); appare dunque evidente il ruolo strategico che tale patrimonio riveste nella più ampia strategia per

## Technology as enabling interface within transition spaces for the smart Heritage

**Abstract.** The current and increasingly intensive technocratic drift recognises the indiscriminate power of techniques in solving several problems, including the struggle against climate change and its impact on cities. One of the future challenges concerns the effective and conscious application of KETs for the creation of smart environments in historical heritage, which plays a strategic role for its conservative values, but also in the broader strategy for limiting greenhouse gas emissions. The proposed paper reports some preliminary results of a research aimed at investigating and acknowledging these technologies as an enabling medium to undertake more informed deterministic choices in the field of CH.

**Keywords:** Smart Heritage; Liminal spaces; Smart sensor systems; eHeritage; Heritage-plus.

## Foreword

The present age has seen a strengthening of the role of science and technology in every sphere of daily life, recognising the 'dominance' of technologies in solving problems of any kinds, even capable of overpowering the so-called technical knowledge. However, this often occurs without an appropriate and conscious management of these tools, especially with the construction sector, which has always been reticent – also for its own nature – towards innovation, risking turning into a technocratic drift.

On the other hand, the enabling capabilities of new technologies offer the concrete possibility of combining the unavoidable critical and heuristic approach of the designer with the scientific rigor of these tools, thus enabling new skills.

The term "enabling" refers to the concept of Key Enabling Technolo-

gies (KETs), even if with an adequate critical-reinterpreting vision. Yet in 2009, KETs were defined by the European Commission as new and complex technologies capable of improving and innovating products and processes in every industrial sector, generating advantages in terms of scientific research, industry and employment, improving living conditions as well (COM, 2009). In Italy, also the PNRR focuses on the importance of KETs as an essential tool for knowledge advancement, specifying that they must include, among others: advanced simulation and big data analysis and management; advanced technologies for energy and the environment; sustainable mobility; applied technologies and cultural heritage; technologies for biodiversity and environmental sustainability; technologies for the industrial digital transition and Industry 4.0.

limitare le emissioni di gas serra climalteranti, nonché la scarsità di risorse energetiche, garantendo standard adeguati alle aspettative dell'utenza. La sfida dei prossimi anni riguarda pertanto, un'applicazione efficace e consapevole delle KETs anche al patrimonio storico con il fine di creare *smart environment*.

La ricerca qui documentata mostra alcuni risultati preliminari per il raggiungimento di questo obiettivo: indagare e riconoscere a tali tecnologie un possibile ruolo di sussidio, già dalle prime fasi meta-progettuali, ponendosi come medium abilitante per intraprendere scelte deterministiche più consapevoli rispetto al passato.

## Stato dell'arte

L'analisi della letteratura mostra quanto sia frequente trovare il termine *smart* associato a edifici di nuova costruzione o a materiali, componenti e sistemi di "nuova generazione". È invece molto raro rilevare interazioni tra il dominio del patrimonio culturale storico (*Cultural Heritage – CH*) e quello dello *Smart Environment* (Hajjaji *et al.*, 2021). Le applicazioni più frequenti di tecnologie abilitanti al patrimonio storico sono ancora limitate e catalogabili in relazione a specifiche finalità, in accordo con quanto emerso da una copiosa analisi di *literature review* finalizzata a documentare lo stato dell'arte di tali tecnologie ap-

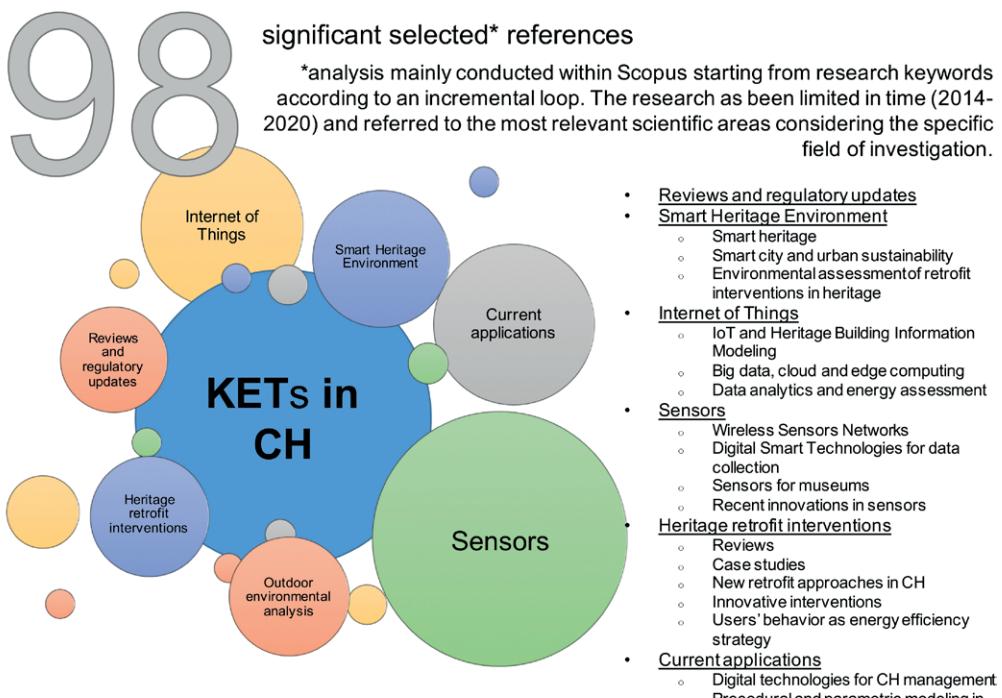
plicate al patrimonio storico (n.d.a. le stringhe di ricerca sono quelle indicate in Fig. 1).

L'impiego più diffuso riguarda gli edifici a destinazione specialistica, perlopiù museale, per il rilievo di parametri ambientali, al fine di controllare le condizioni interne, in modo da renderle idonee alla conservazione delle opere in essi ospitate (Camuffo, 2019). Altro campo di applicazione è quello relativo alla creazione di *Digital Twin*, modellazione e simulazione software, per la conduzione di analisi prestazionali con finalità di controllo e adeguamento sismico ed energetico. In tempi più recenti, la sensoristica avanzata si applica anche alla raccolta sul campo di dati prestazionali relativi a sistemi strutturali (monitoraggio fessurazioni sui paramenti murari o di solai lignei) o a parametri relativi al comportamento termico e igrometrico dell'involucro, per aumentare la conoscenza diretta degli edifici storici, ancora tradizionalmente legata a nozioni di letteratura o qualitative (Hansen *et al.*, 2018).

A fianco alla raccolta di una sempre crescente quantità di informazioni, si sono evoluti anche i processi di elaborazione dei *big data*, per la messa in rete e la successiva condivisione della conoscenza acquisita.

Un altro settore con interessanti applicazioni di KETs al CH è il rilievo 3D, che si avvale di dispositivi evoluti per la raccolta e

SYSTEMATIC REVIEW Scopus research strings	
BUILDING	<i>building, real estate, property, properties, estate, dwelling, edifice, habitation, house, building stock, heritage</i>
INNOVATION/SMART	<i>smart, advanced, innovative, digital</i>
SMART ENVIRONMENT	<i>smart environment</i>
PROCESS	<i>process, evaluation, analysis, assessment, technologies, digital, method, investigation</i>
PERVERSIVE	<i>diffused, pervasive, low cost, easy to use, widespread, permeating, pervading</i>
ENVIRONMENT	<i>climate mitigation, resilience, climate change, environment</i>
ENERGY	<i>energy use, energy consumption, energy efficiency, energy retrofit, energy enhancement, energetic efficiency, energetic retrofit, energetic enhancement</i>
ENVIRONMENTAL CONTROL	<i>comfort, environment, quality, IAQ</i>
IN/OUT	<i>indoor, outdoor, envelope, courtyard, arcade, exterior gallery, portico, porch, colonnade, loggia</i>
IOT	<i>IOT, sensor, big data, mega data</i>
KETS	<i>KETS, nanotechnology, microelectronics, nanoelectronics, photonics, advanced materials, monitoring, simulating, modelling</i>
HERITAGE	<i>heritage, culture heritage, historic, listed build</i>



successiva restituzione tridimensionale di informazioni geometriche degli edifici (Dawn and Biswas, 2019). Ancora, si nota il sempre crescente interesse verso procedure di realtà aumentata e *serious gaming* come strumento di coinvolgimento degli utenti, sia in ambiente espositivo sia con finalità divulgative (Huang *et al.*, 2019).

L'alto potenziale di innovazione connesso all'utilizzo di tali tecnologie sembra quindi riuscito a permeare solo marginalmente nel CH, nonostante quest'ultimo possa rappresentare terreno fertile. L'uso delle KETs è ancora finalizzato a scopi specifici, per lo più legati alla necessità di ottenere dati o semplificare processi. Manca un impiego per rivoluzionare il modo con cui tali edifici vengono gestiti, in maniera manuale o automatizzata, per migliorarne le prestazioni e ridurre i consumi verso la neutralità carbonica.

Nel caso del patrimonio storico, l'enorme potenziale dato dalla gestione intelligente e consapevole dei nuovi strumenti materiali (nanotecnologie, Materiali a Cambiamento di Fase, e *Smart Materials*) e immateriali (digitali) ha il duplice fine di conservare i beni storici e valorizzarne i caratteri per i quali sono testimoni del concetto ancestrale di sostenibilità.

Altresì carente è ancora lo studio dello spazio *outdoor* e, più nello specifico, del rapporto tra *indoor/outdoor* e involucro edilizio, quale elemento di separazione cui è affidato il compito di regolare le interazioni tra i due. Il tema assume particolare rilevanza in questo periodo di policrisi (Mussinelli *et al.*, 2022) in cui surriscaldamento globale e pandemia hanno fatto emergere la necessità di intervenire sulle città per migliorarne le prestazioni ambientali. In tale contesto assumono un ruolo strategico i centri storici, nei quali è frequente trovare spazi semi-esterni

Within the construction sector, the adoption of KETs can take place with different purposes and objectives, most easily related to new constructions. However, as far as making the most of the built environment, particularly the historical one, is concerned, this domain is still scarcely explored, although the strategic plans for the years to come highlight the need to intervene for its conservation and value enhancement also in this view. Italy alone owns 4.7% of the world's historical building heritage (Galatioto *et al.*, 2017), which occupies approximately 46% of the entire country (UNESCO, 2019). In Europe, historical buildings account for 24-35% of total building stock area, and can consume 27-42% from the nation's final energy consumption (Blumberga *et al.*, 2019). Therefore, the strategic role that heritage plays in the broader strategy to

limit greenhouse gas emissions, as well as the scarcity of energy resources, by guaranteeing standards that meet the expectations of users is evident. So, the challenge for the next years concerns an effective and conscious application of KETs even to the historical heritage with the intention of creating smart environments. The research documented here presents some preliminary results for the achievement of this objective: to investigate and recognise a possible role of aid to such technologies, already from the early meta-design phases, acting as an enabling medium to undertake more informed deterministic choices than in the past.

#### State of the art

The literature analysis shows how often the term "smart" is found associated with "new generation" buildings,

o esterni di prossimità dotati di grande valenza architettonico/ambientale, fondamentali anche per la vita economica della società, spesso dipendente dai processi di attrattività turistica legati alla fruizione dei centri minori.

#### Obiettivi e metodologia

Il presente contributo restituisce i risultati del primo anno di ricerca documentale del progetto TECH-START PRIN 2017<sup>1</sup>. Nell'ambito della ricerca, l'obiettivo specifico delle attività qui documentate (in particolare condotte dalle unità di ricerca Unife e CNR) è la messa a punto di un processo per la comprensione e riattivazione del ruolo originale di controllo microclimatico degli spazi di transizione negli edifici storici per la creazione di *smart environment* (IATE 2018), grazie all'uso di KETs come strumenti di indagine, gestione e valorizzazione della conoscenza e degli spazi. L'obiettivo finale è quello di giungere alla definizione di una relazione di interesse fra il potenziale insito in tali tecnologie e il patrimonio architettonico storico (*smart heritage*). La prima fase della ricerca ha permesso la costruzione di un processo metodologico replicabile per la definizione di strategie di intervento sul patrimonio storico, evidenziando gli attuali limiti del sistema.

I risultati del progetto mirano, dunque, a rispondere alle seguenti domande di ricerca:

- È possibile creare sistemi automatizzati di monitoraggio delle *performance* ambientali negli edifici storici capaci di adattarsi alle esigenze degli utenti?
- Quali sono le strategie progettuali per riattivare il ruolo di mediatore ambientale degli spazi semi-esterni/di transizione nel CH?

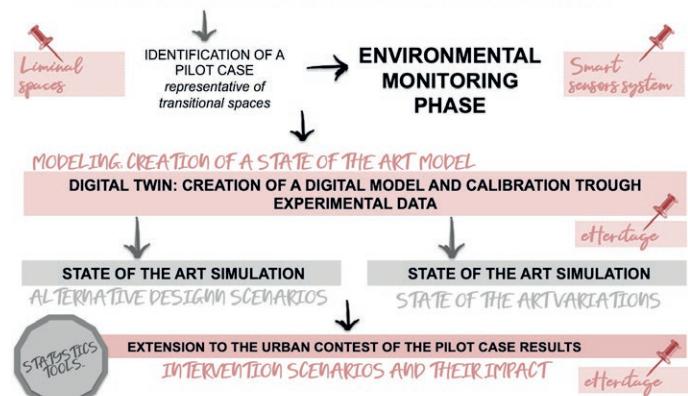
materials, components, or systems. On the other hand, it is very rare to detect interactions between the domain of Cultural Heritage (CH) and that of the Smart Environment (Hajjaji *et al.*, 2021). The most frequent applications of enabling technologies to heritage are still limited, and they can be categorised in relation to specific purposes, in accordance with the findings of a copious literature review aimed at documenting the state of the art of such technologies applied to historical heritage (research strings are shown in Fig. 1). The most widespread use throughout history concerns buildings for specialised use, mostly museums, for the survey of environmental parameters to control the internal conditions, so that they are suitable for the conservation of works housed within them (Camuffo, 2019). Another field of application is related

to the creation of Digital Twins, software modelling and simulation to conduct performance analyses for seismic and energy control and adaptation. In more recent times, advanced sensors are also applied for on-site collection of performance data related to structures (monitoring of wall cracks or wooden floors) or parameters concerning the hygro-thermal behaviour of the envelope, to increase direct knowledge of historical buildings, traditionally linked to literary or qualitative notions (Hansen *et al.*, 2018).

Alongside the collection of an ever increasing quantity of information, thanks to new tools, also the processes for big data elaboration, networking and, subsequently, sharing the acquired knowledge have evolved.

Another sector with interesting applications of KETs in CH is the 3D survey, which makes use of advanced devices

## KETS AS MEDIUM FOR THE CREATION OF SMART ENVIRONMENT IN CULTURAL HERITAGE



- Esistono sistemi di elaborazione dati per prevedere in modo speditivo l'impatto delle scelte progettuali quando applicate su un tessuto storico più ampio e non solo sul singolo edificio?

Per rispondere a tali domande e a partire dall'attività di literature review relativa ad applicazioni di KETs al CH, è stato adottato un processo metodologico atto ad evidenziare, per ciascun ambito di tali applicazioni, limiti e aspetti ancora da sviluppare. Al fine di mettere a sistema i diversi tasselli di ogni step procedurale (Fig. 2), a ciascuno di essi è stato collegato un concetto chiave, individuato nell'ambito di tale prima fase della ricerca e corrispondente ad un diverso step di messa punto e affinamento di tale processo.

### Risultati raggiunti

I concetti chiave identificano una precisa fase dell'attività di ricerca, sintetizzando gli approfondimenti che hanno permesso di proseguire negli step successivi di tale processo e collaborando alla definizione di un glossario condiviso (la prima deliverabile del progetto). Inoltre, questo primo importante risultato ha permesso di mettere a sistema la grande mole di dati e informazioni sulle tematiche oggetto della ricerca PRIN, ambiti ampiamente indagati ma ancora senza una visione di insieme capace di rispondere ai quesiti sopra richiamati.

Di seguito si riporta dunque una sintesi dei concetti-chiave inseriti al termine della prima fase della ricerca.

Il primo concetto, *liminal spaces*, rappresenta l'oggetto specifico di indagine; elemento ricorrente nell'edilizia storica rappresentativo delle interazioni complesse di natura energetico-

ambientale tra spazi esterni di prossimità, ambienti interni attigui e involucro edilizio. La scelta di concentrarsi sugli spazi di transizione mira a superare il tradizionale approccio progettuale che considera separatamente lo spazio indoor (calcolo dei consumi e comfort ambientale interno) e lo spazio esterno (materia perlopiù di interesse della pianificazione urbana). L'orientamento proposto ricerca invece la loro mutua interazione e gli effetti che essi generano sulle emissioni di sostanze climalteranti e sulle cause del surriscaldamento delle città. Questa visione assume maggiore rilievo quando si opera sul tessuto storico, caratterizzato, più del nuovo, dalla presenza di portici, loggiati, corti e cortili, oltre ai cosiddetti spazi "filtro", vani ipogei o sottetto, aventi in comune il ruolo di "mediatore" tra condizioni ambientali interne ed esterne. Tuttavia, il loro compito è stato spesso ignorato o non compreso; grazie allo studio del loro funzionamento e agli strumenti tecnologici di cui siamo in possesso, è oggi necessario individuare le strategie per riattivare queste "KETs ante litteram" del passato.

Con il secondo e il terzo concetto infatti, *Smart Sensors' Systems* e *eHeritage*, si identificano gli strumenti tecnologici (senza derive tecnocratiche) con cui innescare questo processo di riattivazione.

to collect and, subsequently, return the geometric information of buildings in a three-dimensional way (Dawn and Biswas, 2019). Furthermore, it is worth mentioning the ever-growing interest in augmented reality procedures and serious gaming as tools for user involvement, both in the exhibition environment and for dissemination purposes (Huang *et al.*, 2019).

The high innovation potential associated with the use of these technologies seems, therefore, permeated only marginally in CH, despite this can represent a fertile ground. The use of KETs is aimed at specific purposes, mostly related to the need to obtain data or to simplify processes. There is no use to upset the way these buildings are managed, manually or automatically, to improve their performance, reduce consumption and promote carbon neutrality.

In the case of CH, this enormous potential, given by intelligent and conscious management of new tangible materials (nanotechnologies, Phase Change Materials, and Smart Materials in general), and intangible (digital) tools, has the dual purpose of preserving historical assets, and of enhancing the signs for which they are witnesses of the ancestral concept of sustainability.

Finally, there is still a lack of study of the outdoor spaces and, more specifically, of the relationship between indoor/outdoor areas and the building envelope as a separating element, entrusted with the task of regulating interactions between the two. This issue assumes particular importance in this period of polycrisis (Mussinelli *et al.*, 2022) in which global warming and the pandemic have highlighted the need to intervene in cities to improve their en-

vironmental performance. Historical centres acquire a strategic role in this context. Indeed, in such sites it is common to find semi-external or external proximity spaces with great architectural/environmental value, which are also essential for the economic life of society, and often depend on tourist attraction processes linked to the use of smaller towns.

### Objectives and method

This contribution describes the results of the first year of the TECH-START PRIN 2017<sup>1</sup> research. Within the framework of the project, the specific objective of the activities documented here (in particular conducted by the Unife and CNR Research Units) is the development of a process to understand and reactivate the original role of microclimatic control of transitional spaces in historic buildings,

for the creation of smart environments (IATE 2018), by using KETs as tools for the investigation, management and value enhancement of knowledge and spaces. The ultimate goal is to define a relationship of interest between the potential inherent in such technologies and the historic architectural heritage (smart heritage).

The first phase of the research allowed the construction of a replicable methodological process for the definition of intervention strategies on the historical heritage, highlighting the current limitations of the system.

The research outputs aim to answer to the following questions:

- Is it possible to create automated environmental performance monitoring systems in historic buildings able to adapt themselves to user needs?
- Which are the design strategies to reactivate the environmental medi-

Il termine *Smart Sensors' System* ambisce a definire un quadro di riferimento per l'applicazione di sensori e/o reti di sensori nel CH, principalmente per il monitoraggio energetico-ambientale dell'edificio.

I sensori rappresentano una delle tecnologie fondamentali per abilitare il processo di digitalizzazione in atto e assumono particolare rilevanza per acquisire consapevolezza sull'ambiente circostante, fornendo un ausilio in termini di sicurezza e sorveglianza (Hunter *et al.*, 2010). Sebbene essi vengano spesso associati ad apparecchiature industriali, il cosiddetto IoT<sup>2</sup> non potrebbe esistere senza i sensori intelligenti, dispositivi che eseguono funzioni predefinite al rilevamento di input specifici, elaborando i dati prima della loro trasmissione (Posey, 2021).

Nell'ambito della ricerca il termine si riferisce alla raccolta dati con finalità di controllo e monitoraggio delle prestazioni energetico-ambientali dell'edificio, ponendo particolare attenzione nei confronti di tecnologie ritenute "ad alto potenziale" di replicabilità e pervasività, capaci di interagire in maniera responsiva con dispositivi IoT. Tutto questo nel rispetto dei principi cardine che regolano l'intervento su edifici storici: compatibilità, riconoscibilità, reversibilità e minimo intervento. L'aspetto più delicato nella progettazione di un sistema di monitoraggio in ambiente di pregio è proprio la scelta attenta e critica delle tecnologie. È dunque compito del progettista (un campo dove gli automatismi deterministici non riescono "ad arrivare") selezionare, grazie alla sua capacità critica, soluzioni adeguate, in grado di fornire le informazioni richieste senza compromettere la lettura originale degli ambienti in cui vengono installati (Lucchi *et al.*, 2019). Inoltre, se l'obiettivo è abilitare il ruolo di controllo microclimatico degli spazi liminali, la presenza di un sistema di sensori

non dovrà limitarsi alla sola campagna di monitoraggio, bensì sarà necessario prevederne la presenza continuativa per favorire lo scambio di dati con l'utente e/o le centraline domotiche di tali ambienti. In primis sarà dunque necessario approcciarsi al progetto del sistema di rilievo e raccolta dati che, in edifici pubblici di particolare rilevanza (musei, teatri, scuole, uffici) può divenire occasione di divulgazione di temi che sottendono la presenza di tali sistemi negli ambienti. La consapevolezza degli utenti contribuisce, infatti, al successo di tutto il processo.

I dati raccolti attraverso le azioni di *monitoring* sono poi utili per la calibrazione dei modelli digitali di simulazione e per la comprensione dei comportamenti energetico-ambientali passivi degli spazi di transizione, per costruire un modello di funzionamento potenzialmente replicabile. L'impiego di strumenti di valutazione statistica avanzata (*data analytics*) consente poi la messa a sistema di tale modello per l'estensione su scala urbana.

È in questo contesto che si inserisce il terzo termine, *eHeritage*, coniato per estendere il concetto di "digitalizzazione" al mondo dell'Heritage. Il prefisso "e" fa infatti riferimento alla comunicazione tramite reti telematiche, come avvenuto in molteplici altri settori<sup>3</sup>.

Con tale parola chiave sono state sistematizzate opportunità, tipologie e potenziale applicativo del paradigma IoT al CH, al fine di elaborare, governare e sistematizzare i dati raccolti. Questa fase ha permesso, da un lato, di confrontare i dati reali con quelli simulati, facendo previsioni sul comportamento degli spazi analizzati in diverse configurazioni e, dall'altra, di condurre analisi avanzate per la valutazione dell'impatto di diverse soluzioni su aree più estese della città<sup>4</sup>. La raccolta di

ating role of semi-exterior/transitional spaces in the CH?

- Are there data processing systems to expeditiously predict the impact of design choices when applied to a larger historic stock and not only to a single building?

In order to answer these questions and starting from the literature review concerning applications of KETs to CH, a methodological process was adopted, to highlight, for each field of such applications, limitations and aspects still to be developed.

In order to systematise the different pieces of each procedural step (Fig. 2), a key concept was linked to each of them, identified within the framework of this first phase of the research and corresponding to a different step of fine-tuning and refinement of this process.

### Achievements

The key concepts identify a precise phase of the research activity, summarising the insights that made possible to continue the subsequent steps of this process, and collaborating in defining a shared glossary (the project's first deliverable). In addition, this first important result made possible to systematise the large amount of data and information on the topics covered by the PRIN research, areas that have been extensively investigated but which still lack of an overall view capable of answering to the questions mentioned above.

The following is a summary of the key concepts framed at the end of the first research phase.

The first concept, liminal spaces, is the object of investigation. A recurring element in historic buildings, it is representative of the complex energy-envi-

ronmental interactions between proximity outdoor spaces, adjacent indoor spaces and the building envelope. The decision to focus on transitional spaces seeks to overcome the traditional design approach that considers separately indoor space (calculation of consumption and indoor comfort) and outdoor space (a subject mostly of interest to urban planning). The proposed approach, on the other hand, studies their mutual interference and the effects they generate on greenhouse emissions and the causes of overheating in cities. This view assumes greater importance when working on the historical city, characterised more than the new one by the presence of porches, loggias, courtyards, as well as the so-called 'buffer' spaces, underground or attic spaces, which share the role of 'mediator' between internal and external environmental conditions. However, their

role has often been ignored or not understood. Thanks to the study of their functioning and the technological tools available today, it is now necessary to identify strategies to reactivate these '*ante litteram* KETs' of the past.

In this regard, the second and third concepts, Smart Sensors' Systems and *eHeritage*, identify the technological tools (without technocratic drift) that can be used to trigger this reactivation process.

The term Smart Sensors' System aims to define a framework for the application of sensors and/or sensor networks in the CH, mainly for energy-environmental building monitoring purpose. Sensors represent one of the key technologies to enable the ongoing digitisation process, and are particularly important to gain awareness of the surrounding environment, providing an aid in terms of security and surveil-

questi dati (sia *raw* – i cosiddetti dati grezzi – sia elaborati) su piattaforme condivise può inoltre essere utile per la successiva messa a punto di processi di *governance* efficaci ed efficienti, anche in relazione ad interventi di conservazione preventiva e di *retrofit* energetico-ambientale del bene, potendo così contare anche sull'ambito del CH per mettere in campo strategie per contrastare il cambiamento climatico, garantendo al contempo standard elevati di comfort *indoor* dell'utenza finale.

In tale concetto rientrano anche tecniche di natura statistica, capaci di elaborare modelli predittivi molto accurati attraverso l'analisi di grandi moli di dati per mezzo di procedure di inferenza statistica (ad es. analisi di regressione, *conditional demand analysis* e reti neurali) (Catalina *et al.*, 2013). La loro applicazione permette di definire, grazie alle innumerevoli informazioni da fornire al calcolo, un “modello di funzionamento” della strategia adottata, prevedendone l'impatto se applicato alla grande scala. Tuttavia, i limiti emersi nell'applicazione di tali strumenti al CH sono molteplici; in primis il fatto che essi vengano perlopiù mutuati da altri settori (fisica e matematica, oltre all'ambito economico-reattivo). È dunque necessario un ulteriore adattamento al mondo delle costruzioni. La ricerca si sta occupando di individuare i sistemi più appropriati, a partire dall'uso di una funzione di regressione, per capire quali siano, fra i molteplici possibili, i dati di *input* e *output* da fornire/chiedere al calcolo per ottenere il risultato richiesto nel modo più semplice e praticabile possibile, tenendo conto del fatto che la quantità di informazioni necessarie (centinaia o migliaia di dati a seconda dell'accuracy desiderata) per il funzionamento di tali sistemi non è sempre facilmente reperibile. Il secondo problema dipende dal fatto che questi strumenti sono molto

sofisticati e di difficile applicazione per i “non addetti ai lavori”. Tra gli scopi della ricerca vi è pertanto la messa a punto di un metodo il più possibile *user-friendly* per l'impiego di tale potenziale tecnologico, per l'ottenimento di dati altrimenti non reperibili utilizzando i metodi progettuali tradizionali. Questo passaggio sembra fondamentale proprio nell'ottica di superare la deriva tecnocratica di cui si parlava in apertura, assecondando le potenzialità di strumenti sofisticati e accurati ma senza perderne la possibilità di controllo e supervisione.

Un altro limite emerso in questa fase della ricerca riguarda la mancanza di strumenti predittivi/simulativi che mettano in relazione in un unico modello integrato lo spazio *indoor* con quello *outdoor*. Sarà quindi necessario sviluppare sistemi di calcolo ad alta interoperabilità, grazie alla continua evoluzione delle tecnologie che mettono in comunicazione strutture software differenti.

Il quarto e ultimo termine, *Heritage-plus*, rappresenta il fine ultimo delle attività costituenti il processo metodologico di ricerca. Con esso si intendono strumenti, metodi e soluzioni tecnologiche per l'attuazione di interventi di *retrofit* energetico-ambientale del patrimonio storico, comprendendo anche il risultato dell'interazione con gli utenti.

L'attività del secondo anno della ricerca ha riguardato un'intensa campagna di monitoraggio e successiva simulazione ambientale di un caso pilota (Palazzo Costabili a Ferrara) sul quale testare il diverso impatto di molteplici strategie di intervento, ipotizzate con l'obiettivo di creare un habitat sociale e ambientale di qualità (Figg. 3, 4). Grazie a tale raccolta e sistematizzazione di informazioni, sarà dunque possibile mettere a punto una matrice di strategie di valorizzazione da calibrare poi –

lance (Hunter *et al.*, 2010). Although they are often associated with industrial equipment, the so-called IoT<sup>2</sup> could not exist without smart sensors, devices that perform predefined functions upon detecting specific inputs, processing the data before transmitting them (Posey, 2021).

In the research context, the term refers to data collection with the aim of controlling and monitoring the energy-environmental performance of buildings, with particular focus on technologies considered to have 'high potential' for replicability and pervasiveness, capable of responsively interact with IoT devices. This approach respects the main principles governing interventions on historical buildings, precisely compatibility, recognisability, reversibility and minimum intervention. The most delicate aspect in the design of a monitoring system in historic

environments is the informed choice of technologies. It is up to the critical skills of the designer (a field where deterministic automatisms fail to 'enter') to select appropriate solutions capable of providing the required information without compromising the original reading of the spaces in which they are installed (Lucchi *et al.*, 2019).

In addition, if the objective is to enable the role of microclimatic control of the liminal spaces, the presence of a sensor system should not be limited to the monitoring campaign, but it will be necessary to provide for its continuous presence in order to facilitate the exchange of data with the user and/or the domotic control units of these environments. Therefore, the survey and data collection system will be the first project, which, in public buildings of particular relevance (museums, theatres, schools, offices) also becomes

an important opportunity for the dissemination of concepts underlying the presence of such systems. Indeed, user awareness contributes to the success of the whole process.

The data collected through monitoring actions are then useful to calibrate digital simulation models and to understand the passive energy-environmental behaviour of transition spaces in order to build a potentially replicable functioning model.

The use of advanced statistical evaluation tools (data analytics) then allows the systemisation of this model for its application in the urban scale. The third term, *eHeritage*, stands within in this context. It has been defined within the PRIN research to extend the concept of "digitisation" to the world of Heritage. Indeed, the prefix '*e*' refers to communication via telematic networks, as occurred in many other sectors<sup>3</sup>.

This keyword has been used to systematise opportunities, types, and application potential of the IoT paradigm within CH, to process, govern and systematise the collected data. Therefore, this phase allowed, on the one hand, to compare the real data with the simulated data, making predictions on the behaviour of the analysed spaces in different configurations; and, on the other hand, to conduct advanced analyses for the evaluation of the impact of different solutions on a more extended area of the city<sup>4</sup>.

The collection of these data (both raw and processed data) on shared platforms can also be useful for the subsequent development of effective and efficient governance processes, also in relation to preventive conservation and the building's energy-environmental retrofit, being able to also rely on CH to deploy strategies to fight

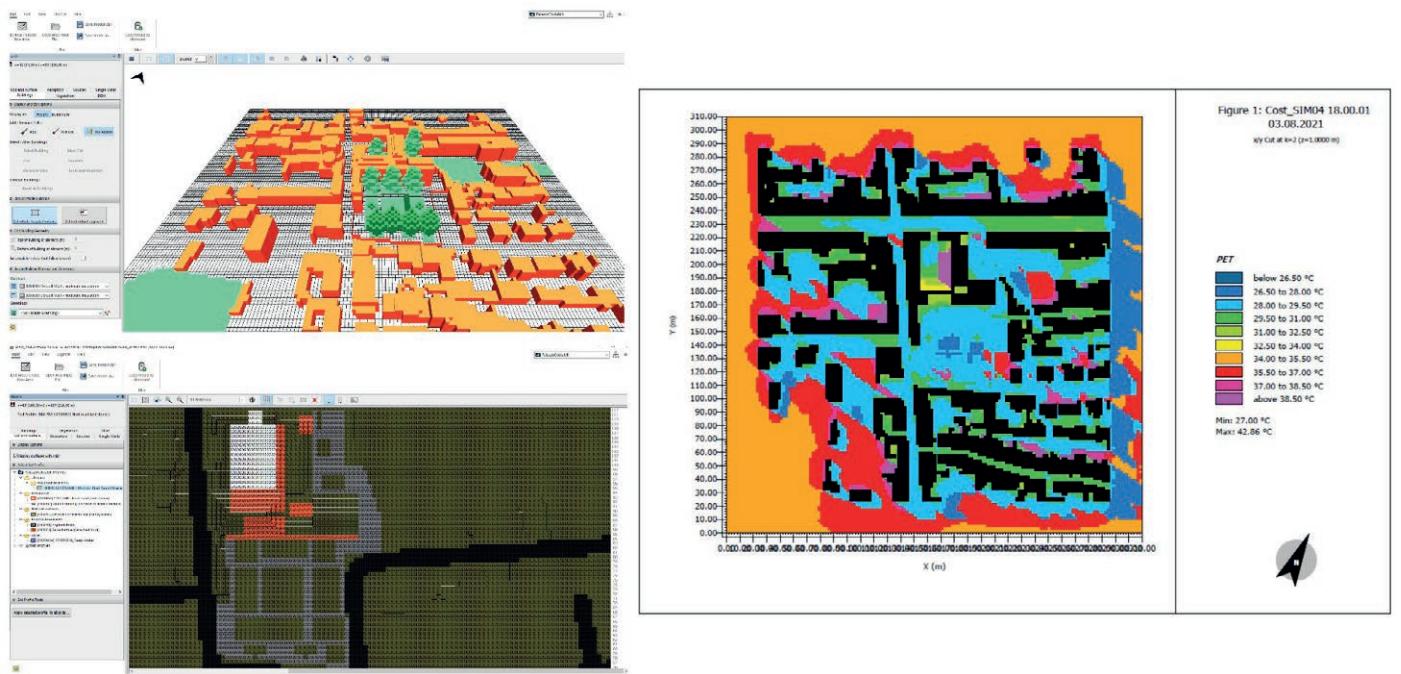
03| L'immagine mostra il modello ENVI-met® del caso pilota, Palazzo Costabili detto di Ludovico il Moro, sede del Museo Archeologico di Ferrara e uno stralcio dei risultati del calcolo del PET (Physiological Equivalent Temperature – Temperatura Fisiologica Equivalente). Il modello è stato realizzato in collaborazione alla unità di ricerca CNR Roma, BhiLab – F. Calcerano, L. Martinelli, M. Galvano e E. Gigliarelli).

The image shows the ENVI-met® model of the pilot case, Palazzo Costabili known as Palazzo di Ludovico il Moro, seat of the Archaeological Museum of Ferrara, and an excerpt of the results of the PET (Physiological Equivalent Temperature) calculation. The model was realised in collaboration with the research unit : CNR Rome BhiLab – F. Calcerano, L. Martinelli, M. Galvano and E. Gigliarelli)

03 |

IMMAGINE	DESCRIZIONE	SET DATI AMBIENTE										PET NELL'AMBIENTE PRIMARIO_0h 13.00 °C	PET NELL'AMBIENTE VICINO_0h 13.00 °C			
		PRIMARIO					VICINO									
		dimensioni [m <sup>2</sup> ]	stesso sup. orizzontale (%)	stesso sup. verticale (%)	elofania assoluto [ora]	% punti confidenza sul confine	dimensioni [m <sup>2</sup> ]	stesso sup. orizzontale (%)	stesso sup. verticale (%)	elofania assoluto [ora]	% punti confidenza sul confine					
1	STATO DI FATTO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 3	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	32,06	47,16	
2	STATO DI FATTO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 3	249,1	0,86	0,33	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,94	47,16	
3	STATO DI FATTO - AMBIENTE 4 SU "VICINO" 5	57,8	0,86	0,33	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,32	40,93	
4	STATO DI FATTO - AMBIENTE 6 SU "VICINO" 7	176,8	0,86	0,33	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,77	42,48	
IMMAGINE 1 TESTO MATERIALE/PIANTI	TESTO MATERIALE/PIANTI	MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 3 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici)	100,4	0,86	0,44	4,80	100%	622,9	0,81	0,44	4,75	0	0%	no	34,49	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 3 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici)	249,1	0,86	0,36	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,77	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 4 SU "VICINO" 5 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici)	57,8	0,86	0,36	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,32	40,93
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 6 SU "VICINO" 7 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici)	176,8	0,86	0,36	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,99	42,48
		PERMUTAZIONE 1 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici e dei muri di cinta)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,33	4,75	0	0%	no	32,41	47,16
		PERMUTAZIONE 2 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici e dei muri di cinta)	249,1	0,86	0,33	0,26	100%	622,9	0,81	0,33	4,75	0	0%	no	41,49	47,16
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 2 (PARETI INTROACCIAI MURI)	57,8	0,86	0,33	2,43	68%	932,3	0,20	0,33	4,29	1	17%	no	41,79	41,38
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 2 (PARETI INTROACCIAI MURI)	176,8	0,86	0,33	3,30	56%	2945,8	0,30	0,33	4,32	3	76%	no	41,31	40,93
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 2 (TUTTO PIETRA, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	31,97	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 2 (TUTTO PIETRA, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	249,1	0,86	0,36	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,79	47,16
IMMAGINE 2 TESTO MATERIALE/PIANTI	TESTO MATERIALE/PIANTI	MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 3 SU "VICINO" 3 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici)	100,4	0,86	0,36	0,33	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	32,04	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 4 SU "VICINO" 5 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici)	57,8	0,86	0,36	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,32	40,93
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 6 SU "VICINO" 7 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici)	176,8	0,86	0,36	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,77	42,48
		PERMUTAZIONE 1 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici e dei muri di cinta)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,33	4,75	0	0%	no	32,41	47,16
		PERMUTAZIONE 2 (PARETI PORTO E LOGGE FACCIA A VITA, rimozione intorno delle pareti di legno e portici e dei muri di cinta)	249,1	0,86	0,33	0,26	100%	622,9	0,81	0,33	4,75	0	0%	no	41,49	47,16
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 2 (PARETI INTROACCIAI MURI)	57,8	0,86	0,36	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,33	40,93
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 2 (PARETI INTROACCIAI MURI)	176,8	0,86	0,36	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,99	42,48
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 3 (TUTTO PIETRA, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	100,4	0,80	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	31,87	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 3 (TUTTO PIETRA, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	249,1	0,80	0,33	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,77	47,16
		INVERSIONE 1 (MATERIALE PRIMARIO - AMBIENTE 4 SU "VICINO" 5 (TUTTO PIETRA, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro))	57,8	0,80	0,33	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,33	40,93
IMMAGINE 3 TESTO MATERIALE/PIANTI	TESTO MATERIALE/PIANTI	MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 6 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	31,85	46,25
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 6 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	249,1	0,86	0,36	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,77	46,25
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 3 SU "VICINO" 6 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	57,8	0,86	0,36	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,33	40,93
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 4 SU "VICINO" 6 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	176,8	0,86	0,36	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,77	42,48
		PERMUTAZIONE 1 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,33	4,75	0	0%	no	32,41	46,25
		PERMUTAZIONE 2 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	249,1	0,86	0,33	0,26	100%	622,9	0,81	0,33	4,75	0	0%	no	41,49	46,25
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 7 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	57,8	0,86	0,33	2,43	68%	932,3	0,20	0,33	4,29	1	17%	no	41,79	41,38
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 7 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	176,8	0,86	0,33	3,30	56%	2945,8	0,30	0,33	4,32	3	76%	no	40,99	42,48
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 8 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	100,4	0,80	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	31,87	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 8 (CORTILE/GARDINO (portico), sostituzione delle pavimentazioni chiavi e chiavi degli spazi aperti)	249,1	0,80	0,33	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,77	47,16
IMMAGINE 4 PIAVIMENTAZIONE	PIAVIMENTAZIONE	MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 3 SU "VICINO" 9 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	31,97	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 4 SU "VICINO" 9 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	249,1	0,86	0,36	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,79	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 5 SU "VICINO" 9 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	57,8	0,86	0,36	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,33	40,93
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 6 SU "VICINO" 9 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	176,8	0,86	0,36	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,77	42,48
		PERMUTAZIONE 1 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,33	4,75	0	0%	no	32,41	47,16
		PERMUTAZIONE 2 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	249,1	0,86	0,33	0,26	100%	622,9	0,81	0,33	4,75	0	0%	no	41,49	47,16
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 10 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	57,8	0,86	0,33	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,33	40,93
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 10 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	176,8	0,86	0,33	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,77	42,48
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 11 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	100,4	0,80	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	31,86	44,47
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 11 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	249,1	0,80	0,33	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,76	44,47
IMMAGINE 5 PIAVIMENTAZIONE	PIAVIMENTAZIONE	MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 3 SU "VICINO" 12 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	57,8	0,86	0,33	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,36	40,96
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 4 SU "VICINO" 12 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	176,8	0,86	0,33	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,99	42,48
		PERMUTAZIONE 1 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	57,8	0,86	0,33	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,36	40,96
		PERMUTAZIONE 2 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	176,8	0,86	0,33	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,99	42,48
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 13 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	31,95	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 13 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	249,1	0,86	0,36	0,26	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	41,77	47,16
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 3 SU "VICINO" 14 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	57,8	0,86	0,33	2,43	68%	932,3	0,20	0,36	4,32	1	17%	no	41,36	40,96
		MODERNA - "VICINO" - AMBIENTE 4 SU "VICINO" 14 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	176,8	0,86	0,33	3,30	56%	2945,8	0,30	0,36	4,32	3	76%	no	40,99	42,48
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 1 SU "VICINO" 15 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di portico e loggia e lasciato in marmo chiaro)	100,4	0,86	0,33	4,80	100%	622,9	0,81	0,36	4,75	0	0%	no	31,95	47,16
		MODERNA PRIMARIO - AMBIENTE 2 SU "VICINO" 15 (PIAVIMENTAZIONE, sostituzione dei muri di														

04| La tabella mostra in riga le strategie progettuali simulate come possibile modifica dello stato di fatto e in colonna le informazioni fornite al modello come dati di input e il risultato ottenuto per il PET per ciascuna strategia simulata. La raccolta di questi dati permetterà la successiva elaborazione della matrice di intervento  
 The table shows in a row the simulated design strategies as a possible change to the status quo and in the columns the information provided to the model as input data and the result obtained for the PET for each simulated strategy. The collection of these data will allow the subsequent elaboration of the intervention matrix



grazie all'intervento consapevole del progettista – *case-by-case*, attraverso il ruolo di medium abilitante delle KETs coinvolte. All'interno di tale matrice confluiranno, oltre ai risultati ottenuti grazie al caso pilota, dati e informazioni provenienti da una serie di *best-practices* relative a compagnie di rilevamento e monitoraggio dati, oltre che modellazione/simulazione ex-ante ed ex-post di interventi attuati relativi all'applicazione di KETs nel progetto di recupero e riqualificazione di edifici storici. La creazione di questa matrice è volta all'impostazione del processo metodologico per la comprensione e riattivazione del ruo-

lo originale di controllo microclimatico degli spazi di transizione negli edifici storici per la creazione di *smart environment*.

## Conclusioni e sviluppi futuri della ricerca

Nell'era della tecnologia dei dati, sfruttare questi ultimi come fonte di conoscenza è senz'altro ineludibile. Per quanto però le applicazioni IoT siano già molto diffuse, l'impressione è quella di trovarsi ancora nelle prime fasi di sviluppo di tecnologie destinate a capillarizzare l'interattività tra dispositivi e utenti, in una realtà che pare ine-

climate change, while ensuring high standards of indoor end-user comfort. This concept also includes statistical techniques able to define very accurate predictive models through the analysis of large amounts of data, using statistical inference procedures (e.g. regression analysis, conditional demand analysis, and neural networks) (Catalina *et al.*, 2013). Their application allows to define, as a result of the countless information to be provided to the calculation, an "operating model" of the adopted strategy, predicting its impact, if applied on a large scale. However, the limitations that emerged in the application of these tools to the CH mostly concern the fact that they are usually borrowed from other sectors (physics and mathematics, in addition to the economic-evaluation field). It is, therefore, necessary to further adapt them to the world of con-

struction. The research is working on identifying the most appropriate systems, starting from the use of a regression function, to understand, among the many options, the input and output data to be supplied to/requested from the calculation to obtain the necessary result easily and feasibly, taking into account that the quantity of information needed (hundreds or thousands of data depending on the desired accuracy) for the operation of such systems is not always easily available. The second problem depends on the fact that these tools are highly sophisticated and difficult to apply for "non-expert" users. So, among the purposes of the research, there is the intention to develop a method that is as user-friendly as possible for using this technological potential, obtaining data that would otherwise not be available with traditional design methods.

This step seems essential precisely with a view to overcoming the technocratic drift mentioned at the beginning, indulging the potential of sophisticated and accurate tools but without losing the possibility of control and supervision.

Another limitation that emerged in this phase of the research concerns the lack of predictive/simulation tools relating indoor and outdoor spaces in a single integrated model. Therefore, it will be necessary to develop highly interoperable computing systems thanks to the continuous evolution of technologies that connect different software structures.

The fourth and final term, *Heritage-plus*, represents the ultimate goal of the activities, making up the methodological research process. It refers to tools, methods, and technological solutions for the implementation of energy-

environmental retrofit interventions of the historic asset, also including the result of user interaction.

The activity of the second year of the research involved an intensive monitoring campaign and subsequent environmental simulation of a pilot case (Palazzo Costabili in Ferrara) on which to test the different impact of multiple intervention strategies, hypothesised with the aim of creating a quality social and environmental habitat (Figs. 3, 4).

Thanks to this collection and systematisation of information, it will, therefore, be possible to develop a matrix of value enhancing strategies to be then calibrated – thanks to the conscious intervention of the designer – *case-by-case*, through the enabling medium role of the KETs involved. Within this matrix, in addition to the results obtained through the pilot case, data

vitabilmente destinata alla connessione tra mondo reale e mondo digitale. Nell'immediato futuro, l'IoT stabilirà connessioni sempre più solide e frequenti con altre tecnologie emergenti, come Intelligenza Artificiale e tecniche di *Machine Learning*, che consentono di effettuare analisi incredibilmente dettagliate, con il vantaggio di implementare continuamente la conoscenza all'interno di una molteplicità di domini.

Gran parte di tali tecnologie però, nonostante costi sempre più accessibili, risultano ancora scarsamente applicate per finalità legate all'efficientamento energetico-ambientale in edifici storici. Grazie alle attività sinora svolte è stato invece possibile mettere a sistema concetti afferenti a domini indipendenti, individuando strumenti e metodi per l'utilizzo delle KETs nel progetto di recupero del tessuto storico al fine di ridurre le emissioni di sostanze climalteranti e aumentare il comfort degli occupanti. Resta ugualmente prioritario definire in modo ancor più specifico quali siano le tipologie e gli usi più comuni di tali tecnologie nell'Heritage, indagando le possibili e futuribili implicazioni del concetto di *Smart Environment*, per affiancare, senza prevaricare, all'inderogabile ruolo di governance critica del progettista, strumenti scientifici in grado di supportarlo nella misura e previsione dei possibili impatti delle soluzioni ipotizzate alle diverse scale. L'uso delle nuove tecnologie deve dunque essere inteso come possibilità inedita di ottenere risultati prima difficilmente conseguibili, passando da valutazioni qualitative a informazioni quantitative.

Il contributo dato dalla ricerca propone, quindi, di offrire nuove possibilità al progettista, dandogli però la responsabilità della scelta delle KETs in funzione delle finalità dell'intervento, per creare un nuovo habitat sociale e ambientale di qualità dove re-

and information from a series of best-practices relating to data collection and monitoring campaigns as well as ex-ante and ex-post modelling/simulation of implemented interventions relating to the application of KETs in the retrofit of historic buildings, will converge.

The creation of this matrix is aimed at setting up the methodological process for understanding and reactivating the original role of microclimatic control of transition spaces in historical buildings for the creation of smart environments.

#### Conclusions and future research developments

In the age of data technology, exploiting data as a source of knowledge is undoubtedly an asset. However, although IoT applications are already widespread, the impression is that we

are still in the early development stages of a technology intended to create capillary interactivity between devices and users, in a reality that seems inevitably destined to connect real and digital worlds.

In the near future, the IoT will establish increasingly strong and frequent connections with other emerging technologies, such as Artificial Intelligence and Machine Learning techniques, which enable extremely detailed analysis, with the advantage of continuously implementing knowledge within a multiplicity of domains.

However, most of these technologies, despite their increasingly affordable costs, are scarcely applied for energy-environmental strategies in historical buildings. Nevertheless, the systematisation of concepts pertaining to independent domains has been possible thanks to the activities carried out,

altà fisica e realtà virtuale coesistono in maniera critica, sotto la guida di un pensiero progettuale capace di gestire una pluralità di discipline ed esigenze (Paris, 2021) e dove l'ambiente interno sia strettamente collegato a quello esterno.

#### ATTRIBUZIONE, RICONOSCIMENTI, DIRITTI D'AUTORE

Il contributo deriva da una riflessione comune delle autrici. Nello specifico: V. Frighi si è occupata della concettualizzazione dei risultati e della stesura iniziale del contributo, M. Calzolari ha curato gli aspetti metodologici e la supervisione generale; a V. Modugno sono da attribuirsi le conclusioni e la stesura finale.

Le autrici afferiscono alla UO Unife insieme a P. Davoli (responsabile UO), F. Conato, B. Caglioti; Dip. FST Unife, D. Vincenzi, G. Mangherini; IUAV, L. Gabrielli, A. Ruggeri. Si ringrazia ISPC-CNR Roma per la collaborazione alle attività.

#### NOTES

<sup>1</sup> PRIN 2017 "TECH START key enabling TECHnologies and Smart environmenT in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation", P.I. M. Losasso, UO: CNR Roma, PoliTo, UniFe, UniNa, Roma Tre, Roma La Sapienza.

<sup>2</sup> *L'Internet of Things* si basa sull'idea di oggetti "intelligenti" tra loro interconnessi attraverso la rete Internet in modo da scambiare le informazioni possedute, raccolte e/o elaborate, e assume un significato pieno proprio nella rete che interconnette questi oggetti, anche di uso quotidiano (PoliMi, Osservatori.net).

<sup>3</sup> È il caso, ad esempio, del termine *eHealth* che in ambito biomedicale indica il complesso delle risorse, soluzioni e tecnologie informatiche di rete, applicate – in maniera pervasiva e diffusa – alla salute e al settore della sanità in generale.

<sup>4</sup> L'analisi ed elaborazione dei dati è ora nella sua fase conclusiva.

identifying tools and methods for the use of KETs in the renovation project of the historical heritage in order to reduce greenhouse emissions and increase occupant comfort.

Defining even more specifically the most common types and uses of these technologies in Heritage remains a priority, investigating the possible and futuristic implications of the Smart Environment concept in order to flank, without overriding, the designer's inescapable role of critical governance with scientific tools that can support the process in measuring and forecasting the possible impacts of the hypothesised solutions at different scales. Therefore, use of new technologies must be understood as unprecedented possibilities to obtain results that were previously difficult to achieve, moving from qualitative assessments to quantitative information.

Hence, the contribution made by the research proposes to offer new possibilities to the designer, while giving him the responsibility of choosing the KETs according to the aims of the intervention, in order to create a new social and environmental habitat of quality, where physical and virtual reality coexist in a critical manner, under the guidance of a design way of thinking capable of managing several disciplines and needs (Paris, 2021), and where the indoor environment is closely connected to the outdoor one.

#### ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

The contribution derives from a common reflection of the authors. Specifically: V. Frighi dealt with the conceptualisation of the results and the initial draft of the paper; M. Calzolari took care of the methodological aspects

## REFERENCES

- Blumberga, A., Freimanis, R., Muizniece, I., Spalvins, K. and Blumberga, D., (2019), "Trilemma of historic buildings: Smart district heating systems, bioeconomy and energy efficiency", *Energy*, Vol. 186, p. 115741.
- Blumberga, A., Vanaga, R., Freimanis, R., Blumberga, D., Antu, J., Krastin, A.U., Jankovskis, I., Bondars, E., and Treija, S. (2020), "Transition from traditional historic urban block to positive energy block", *Energy*, Vol. 202, p. 117485.
- Camuffo, D. (2019), *Microclimate for Cultural Heritage Measurement, Risk Assessment, Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments - 3rd Edition*, Elsevier Science.
- Catalina, T., Iordache, V. and Caracaleanu, B. (2013), "Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand", *Energy and Buildings*, Vol. 57, pp. 302-312.
- COM (2009), "Preparing for our future: Developing a common strategy for key anbliign technologies in the EU", available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0512:FIN:EN:PDF> (accessed on /08/2022).
- Dawn, S. and Biswas, P. (2019), "Technologies and Methods for 3D Reconstruction in Archaeology" In: Thampi, S. *et al.* (Eds) *Advances in Signal Processing and Intelligent Recognition Systems* SIRS 2018. Communications in Computer and Information Science, Vol 968. Springer, Singapore.
- IATE – European Union terminology (2018), "Smart Environment", available at: <https://iate.europa.eu/entry/result/3579068/en> (accessed on 02/09/2022).
- Galatioti, A., Ciulla, G. and Ricciu, R. (2017), "An overview of energy retrofit actions feasibility on Italian historical buildings" *Energy*, Vol. 137, n. 2017, pp. 991-1000.
- Hajjaji, Y., Boulila, W., Farah, I.R., Romdhani, I. and Hussain, A. (2021), "Big data and IoT-based applications in smart environments: A systematic review", *Computer Science Review*, Vol. 39.
- Hansen, T.K., Bjarlov, S.P., Peuhkuri, R.H. and Harrestrup, M. (2018), "Long term in situ measurements of hydrothermal conditions at critical points in four cases of internally insulated historic solid masonry walls", *Energy and Buildings*, Vol. 172, pp. 235-248.
- Huang, W., Xiang, H. and Li, S. (2019), "The application of augmented reality and unity 3D in interaction with intangible cultural heritage", *Evolutionary Intelligence*, available at: <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00314-6> (accessed on 04/08/2022).
- Hunter, G.W., Stetter, J.R., Hesketh, P.J. and Liu, C. (2010), "Smart Sensor Systems", *The Electrochemical Society Interface*, pp. 29-34, available at: [https://www.electrochem.org/dl/interface/wtr/wtr10/wtr10\\_p029-034.pdf](https://www.electrochem.org/dl/interface/wtr/wtr10/wtr10_p029-034.pdf) (accessed on 04/01/2022).
- Lucchi, E., Dias Pereira, L., Adreotti, A., Malaguti, R., Cennamo, D., Calzolari, M. and Frighi, V. (2019), "Development of a Compatible, Low Cost and High Accurate Conservation Remote Sensing Technology for the Hydrothermal Assessment of Historic Walls", *Electronics* 2019, n. 8, p. 643.
- Mussinelli, E., Schiaffonati, F. and Torricelli, M.C. (2022), "Per un cambiamento necessario", *TECHNE – Journal of Technology of Architecture*, Vol. 23, Firenze University Press, Firenze, pp. 15-20.
- Paris, S. (2021), "Progetto e tecnologie, tra scienze e nuovo umanesimo. Innovazioni nella formazione e ruolo dei progettisti", *TECHNE – Journal of Technology of Architecture*, Vol. 21, Firenze University Press, Firenze, pp. 124-132.
- Politecnico di Milano, "INTERNET of THINGS (IoT) Significato, esempi, ambiti applicativi e prospettive di mercato in Italia", available at: [https://blog.osservatori.net/it\\_it/cos-e-internet-of-things](https://blog.osservatori.net/it_it/cos-e-internet-of-things) (accessed on 31/08/2022).
- Posey B. (2021), "Smart sensor", in *Internet of things agenda on Tech Target*, available at: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/smart-sensor> (accessed on 04/01/2022).
- UNESCO, "2019-2020 World Heritage map", available at: <http://whc.unesco.org/en/wallmap/> (accessed on 31/08/2022).

and the general supervision, while the conclusions and the final draft are the work of V. Modugno.

The authors belong to the Unife RU together with DA: P. Davoli (RU scientific PI), F. Conato, B. Caglioti; Dept. FST Unife: D. Vincenzi, G. Mangherini; IUAV: L. Gabrielli, A. Ruggeri. The authors thank ISPC-CNR Rome for the collaboration in the activities.

## NOTES

<sup>1</sup> PRIN 2017 "TECH START key enabling TECHnologies and Smart environment in the Age of gReen economy. Convergent innovations in the open space/building system for climaTe mitigation", PI: M. Losasso, UO: CNR Roma, PoliTo, UniFe, UniNa, Roma Tre, Roma La Sapienza.

<sup>2</sup> The Internet of Things is based on the idea of "intelligent" interconnected objects, through the Web, to exchange

possessed, collected and/or processed information, taking on full meaning precisely in the network that interconnects these objects, also for daily use (PoliMi, Osservatori.net).

<sup>3</sup> This is the case, for example, of the term eHealth, which in the biomedical field indicates the whole network of resources, solutions, and information technologies, applied – in a pervasive manner – to health and the healthcare sector in general.

<sup>4</sup> Analysis and processing of the data is now in its final phase.

Andrea Rebecchi<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-0180-6458>

Marcello Farina<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-4209-9152>

Giuseppe Andreoni<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5537-4128>

Stefano Capolongo<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-4679-9829>

Matteo Corno<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-2644-7487>

Paolo Perego<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-4960-8888>

Emanuele Lettieri<sup>4</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1235-989X>

<sup>1</sup> Dipartimento di Architettura, ingegneria delle costruzioni e ambiente costruito, Politecnico di Milano, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria, Politecnico di Milano, Italia

<sup>3</sup> Dipartimento di Design, Politecnico di Milano, Italia

<sup>4</sup> Dipartimento di Ingegneria Gestionale, Politecnico di Milano, Italia

[andrea.rebecchi@polimi.it](mailto:andrea.rebecchi@polimi.it)

[marcello.farina@polimi.it](mailto:marcello.farina@polimi.it)

[giuseppe.andreoni@polimi.it](mailto:giuseppe.andreoni@polimi.it)

[stefano.capolongo@polimi.it](mailto:stefano.capolongo@polimi.it)

[matteo.corno@polimi.it](mailto:matteo.corno@polimi.it)

[paolo.perego@polimi.it](mailto:paolo.perego@polimi.it)

[emanuele.lettieri@polimi.it](mailto:emanuele.lettieri@polimi.it)

**Abstract.** Il paper descrive metodo e risultati preliminari dell'esperienza di ricerca "Blind-assistive aUtonomous Droid Device: BUDD-e" finanziata nell'ambito del programma *Polisocial Award* 2021 del Politecnico di Milano, avente lo scopo di sviluppare un approccio multidisciplinare per colmare il divario in termini di progettazione inclusiva e rendere gli spazi e i servizi accessibili, funzionali e utilizzabili da persone con limitazioni visive (*Blind and Visually Impaired people*). Lo scopo della ricerca è quello di garantire accessibilità ai luoghi pubblici – sia outdoor che indoor – nell'ambito dei quali il robot BUDD-e assumerà autonomamente il ruolo di guida. Verranno applicati principi di progettazione incentrata sull'utente per supportare l'accessibilità a tali luoghi, dove la guida robotica BUDD-e sarà una caratteristica primaria per consentire la fruizione dei servizi.

**Parole chiave:** Spazi pubblici accessibili; Ambiente costruito inclusivo; Persone con limitazioni visive; Progettazione incentrata sull'utente; Benessere degli utenti.

### **Theoretical background, context scenario and needs analysis**

modo ancora più drammatico, su quella dei gruppi vulnerabili, quali ad esempio le persone con limitazioni visive. È stata limitata la possibilità di sviluppare relazioni sane, partecipare ad eventi, attività sociali, frequentare spazi pubblici; anche le attività quotidiane (ad es. utilizzare i servizi pubblici, fare acquisti,

Le pandemia COVID19 e le relative politiche sociali hanno avuto un forte impatto sulla vita della popolazione e, in

praticare sport) sono state gravemente limitate negli ultimi anni.

La pandemia di COVID19 è un'importante dimostrazione dei doppi effetti dell'urbanizzazione sull'ambiente costruito (Capolongo *et al.*, 2020), ovvero la capacità intrinseca della città contemporanea di essere luogo di opportunità sociali ed economiche e, al tempo stesso, occasione di molteplici fattori di rischio per la Sanità Pubblica e il Welfare Sanitario, a causa delle diseguaglianze sanitarie che possono insorgere. Inoltre, il COVID19 è stato un acceleratore di diverse istanze sociali e digitali, già presenti nelle nostre società contemporanea, ma che hanno trovato nel corso degli anni difficoltà ad essere considerate come temi cruciali da sviluppare: uno su tutti, il tema dell'accessibilità, soprattutto delle categorie di popolazione fragile.

Facendo riferimento all'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), le persone con limitazioni visive (Blind and Visually Impaired, BVI) hanno particolarmente risentito dell'emergenza COVID19 e sono state drammaticamente colpite dalle misure di contenimento, essendo soggetti fragili a rischio di contagio. Questa situazione è causata dal fatto che gli utenti BVI hanno bisogno del contatto tattile con l'ambiente e di una guida per muoversi ed orientarsi all'interno dell'ambiente costruito.

### Shaping accessible public spaces for visually impaired people. The BUDD-e research experience

**Abstract.** The paper describes both the method and the preliminary outcomes of the "Blind-assistive aUtonomous Droid Device: BUDD-e" research experience, funded by Polisocial Award 2021 of Politecnico di Milano, and designed to exploit a multidisciplinary approach to bridge the gap of inclusive design, making spaces and services accessible, functional, and usable by Blind and Visually Impaired (BVI) people. The research purpose is to develop accessible public places and indoor environments where the autonomous robot BUDD-e will act as guide for the BVI people. User-centred design principles will be applied to support accessibility to – both outdoor and indoor – public places, where the robot guide BUDD-e will be a primary feature in allowing access to services.

**Keywords:** Accessible Public Spaces; Inclusive Built Environment; Blind Visually Impaired People; User-Centred Design; User Well-being.

### **Theoretical background, context scenario and needs analysis**

The COVID-19 pandemic and related social policies have strongly impacted the population's life and, even more dramatically, that of vulnerable groups, for instance people with visual impairments. The possibility of developing healthy relationships, of taking part in social events and activities, and of visiting public spaces has been restricted. Even everyday activities (e.g. using public services, shopping, practicing sports) have been severely limited in the last years.

The COVID-19 pandemic is an important demonstration of the dual effects of urbanisation on the built environment (Capolongo *et al.*, 2020), precisely the inherent capacity of the contemporary city to be a place of social and economic opportunities and, at the same time, one presenting mul-

tiple risk factors for Public Health and Sanitary Welfare, due to the health inequalities that may develop. Moreover, COVID-19 was a key accelerator of several social and digital issues, which were already present in our contemporary societies, but struggled to be considered as crucial issues to be addressed, particularly the problem of accessibility, especially for fragile population categories.

According to the World Health Organisation (WHO), Blind and Visually Impaired (BVI) people particularly suffered from the COVID-19 emergency, and are still dramatically affected by the containment measures, being also particularly prone to the risk of contagion. This situation is caused by the fact that BVI people need tactile contact with the environment and a guide for moving and orienteering.

Visually impaired people account for

Le persone con disabilità visive equivalgono al 4% della popolazione globale (circa 253 milioni); in Italia sono poco meno di 2 milioni di cui 219.174 sono assolutamente ciechi (0,3% della popolazione), mentre 1.383.922 (2,3%) hanno un residuo visivo. Tra il 2010 e il 2030 è previsto un aumento delle persone con disabilità visive di circa il 25% a causa dell'invecchiamento della popolazione.

Oggi giorno, le persone con disabilità visive devono affrontare ostacoli quotidiani all'accesso a servizi e beni. Gli spazi condizionati possono risultare scarsamente accessibili per le persone con limitazioni visive, in funzione della mancanza di strumenti ambientali inclusivi. Svariati studi scientifici (Manduchi and Kurniawan, 2011) dimostrano che la perdita della vista aumenta il rischio di lesioni ed evidenzia una correlazione significativa tra il tipo, la gravità e la frequenza delle lesioni e il grado di perdita della vista. Un numero considerevole di persone con limitazioni visive hanno bisogno di compagni vedenti per qualsiasi tipo di spostamento urbano outdoor e indoor (Zeng, 2015); trovare e raggiungere luoghi e orientarsi, ad esempio, centri medici, ospedali e centri commerciali (che spesso non hanno personale sufficiente per offrire aiuto) è problematico anche perché i cani da assistenza spesso subiscono rifiuti di accesso.

In molti Paesi sono state introdotte Leggi e programmi per promuovere la parità di accesso ai servizi per le persone con disabilità visive, quali ad esempio, i documenti UK's Equality Act of 2010 (UK government, 2010) e USA's Americans with Disabilities Act (U.S. Department of Justice, 1990; 2008). Le architetture complesse e di pubblica fruizione devono apportare modifiche sostenibili quanto immediate per rendere accessibili i propri servizi. Per le aziende, sia pubbliche che private, sta di-

4% of the global population (about 253 Million); in Italy, they are just under 2 Million, of which 219,174 are absolutely blind (0.3% of the population), while 1,383,922 (2.3%) have a visual residue. Between 2010 and 2030 an approximate 25% increase in people with visual disabilities is expected due to population ageing.

Nowadays, people with visual impairments face barriers in accessing services and goods. Shared spaces could result almost inaccessible for BVI people, also since inclusive environmental tools are missing. Scientific studies (Manduchi and Kurniawan, 2011) show that vision loss increases the risk of injury, and highlight a significant correlation between type, severity, and frequency of injuries, and the degree of vision loss. A considerable number of BVI individuals need sighted companions when travelling outdoors

(Zeng, 2015). Finding and getting to places, e.g. medical centres, hospitals, and shopping centres (that often do not have enough staff to offer help), is problematic also because guide dogs are often refused access.

In many Countries, Laws, regulations and programmes have been introduced to promote equal access to services for disabled people, for instance the UK's Equality Act of 2010 (UK government, 2010) and the USA's Americans with Disabilities Act (U.S. Department of Justice, 1990; 2008). Complex and public architectures need to develop sustainable and immediate adjustments to make their services accessible. For both public and private companies, it is becoming increasingly important to employ inclusion practices. Shoppers are, in fact, turning to retailers that apply them (Accenture, 2019).

ventando sempre più importante adottare pratiche di inclusione: gli acquirenti si stanno infatti rivolgendo ai rivenditori che le applicano (Accenture, 2019).

La mobilità indipendente dovrebbe essere incoraggiata progettando e costruendo architetture pubbliche accessibili e sviluppando tecnologie assistive. In ambienti interni e strutturati, gli ausili tecnologici maggiormente diffusi per la localizzazione e il tracciamento, variano da quelli che utilizzano i sensori degli smartphone, ai sistemi basati su telecamera (dove una guida remota fornisce istruzioni vocali all'utente) e beacon (Guerreiro, 2019a). Si registrano anche crescenti interessi e ricerche nell'ambito degli ausili quali i cosiddetti "bastoni da orientamento" che integrano sensori digitali e robot guida, che sono ideati per copiare le funzioni dei tradizionali ausili alla navigazione superando alcuni dei loro limiti, ad esempio per orientarsi e spostarsi in ambienti non familiari all'utente. Per guidare la ricerca su questo argomento (Hersh and Johnson, 2012), alcuni studi forniscono un questionario di indagine sui requisiti delle persone con limitazioni visive per una guida robotica, da cui vengono tratte le specifiche di progettazione, ad esempio compattezza, robustezza, affidabilità, presenza di un manico telescopico e locomozione su ruote. Le funzionalità iniziali consentono il superamento degli ostacoli e la navigazione verso la destinazione, ma il robot dovrebbe essere personalizzabile per una gamma più ampia di impostazioni. Le poche guide robot (Chuang *et al.*, 2018; Elgendi *et al.*, 2019; Guerreiro *et al.*, 2019b; Kulkarni *et al.*, 2017; Tobita *et al.*, 2017; Zeng *et al.*, 2019) recentemente sviluppate e presentate al mercato, non sono conformi a questi requisiti, essendo per lo più focalizzati sul solo evitamento degli ostacoli, non personalizzabili e con maniglie rigide.

Independent mobility should be encouraged by designing and building accessible public architectures, and by developing assistive technologies. In indoor and structured places the most widespread devices are those for localisation and tracking, which span those making use of smartphone sensors and camera-based systems (where a remote guide gives instructions), and beacons (Guerreiro, 2019a). There has been also growing research dedicated to enhanced canes and guide robots, which are devised to copy functions of traditional navigation aids while overcoming some of their limitations, e.g. navigating environments unfamiliar to the user.

To drive the research on this topic, Hersh and Johnson (Hersh and Johnson, 2012) provide a survey questionnaire on the requirements of BVI people for a robot guide, from which design specifications are drawn, e.g.

compactness, robustness, reliability, the presence of a telescopic handle, and wheeled locomotion. Initial functionalities should include obstacle avoidance and navigation to destination, but the robot should be customisable for a wider range of settings.

The few robot guides (Chuang *et al.*, 2018; Elgendi *et al.*, 2019; Guerreiro *et al.*, 2019b; Kulkarni *et al.*, 2017; Tobita *et al.*, 2017; Zeng *et al.*, 2019) proposed recently are not compliant with these requirements, being mostly focused on obstacle avoidance alone. They are not customisable, and have rigid handles. The robot guide BUDD-e ("Blind-assistive aUtonomous Droid Device") will overcome the limitations of present robotic guides as it is dynamic, robust and flexible, besides being easily customisable. This will be possible also thanks to the smart tether system, which permits a more intuitive and

La guida robotica BUDD-e (“*Blind-assistive aUtonomous Droid Device*”), oggetto della ricerca che verrà successivamente argomentata, supererà i limiti delle attuali guide robotiche essendo dinamica, robusta e flessibile, oltre ad essere facilmente personalizzabile. Ciò sarà possibile anche grazie al sistema smart-tether, che consentirà un’interazione robot-utente più intuitiva e naturale rispetto le precedenti già disponibili sul mercato. L’analisi della letteratura scientifica, dei brevetti presenti e l’analisi di mercato hanno evidenziato l’opportunità e la necessità di sviluppare un robot guida con le funzionalità quali capacità di muoversi in autonomia in spazi popolati, flessibilità e adattabilità rispetto al comportamento dell’utente (velocità e frequenza del passo) e necessità di un segnalatore acustico.

Dal punto di vista architettonico, luogo della sperimentazione saranno luoghi outdoor e architetture indoor di pubblica fruizione, quali strutture socio-sanitarie e sportive (nella prima fase di sperimentazione), nonché spazi commerciali e culturali/museali (in seconda fase), in quanto rappresentano complessivamente i luoghi essenziali e strategici per l’interazione e l’inclusione sociale (Mosca *et al.*, 2019a).

Tale situazione potrà incidere positivamente anche sulla ripresa di molte attività economiche, favorendo l’accesso degli utenti ipovedenti (compresi gli anziani affetti da deterioramento senile della capacità visiva) alle strutture pubbliche, ai servizi, all’intrattenimento, allo sport e ai luoghi commerciali.

### **Research aim**

Il Progetto di Ricerca “*Blind-assistive aUtonomous Droid Device: BUDD-e*” finanziato dal Polisocial Award 2021 del Politecnico di Milano, mira a sfruttare la multidisciplinarietà del

natural robot-user interaction, compared to the previous ones already available on the market. The analysis of the scientific literature, the licenses present, and the market analysis have highlighted the opportunity and the need to develop a robot guide with functions such as the ability to move independently in crowded spaces, flexibility and adaptability to the user’s behaviour (step speed and frequency), and the need for an acoustic signal. From an architectural point of view, places of experimentation will be outdoor sites and indoor architectures for public use, such as healthcare and sports facilities (in the early phase of experimentation), as well as commercial and cultural/museum spaces (in the second phase), as they represent overall the essential and strategic places for interaction and social inclusion (Mosca *et al.*, 2019a).

This situation could also positively affect the recovery of many economic activities, facilitating access for visually impaired users (including the elderly with senile deterioration of vision) to public facilities, services, entertainment, sports and commercial venues.

### **Research aim**

The “*Blind-assistive aUtonomous Droid Device: BUDD-e*” research experience – funded by Polisocial Award 2021 of Politecnico di Milano – aims at exploiting the multidisciplinarity of the team to bridge the gap towards inclusive design, to make spaces and services accessible to, functional, and usable by BVI people.

The purpose of the research is to support the development of the BUDD-e autonomous robot in technical-IT, technological, managerial and spatial terms, so that it can assume the role of

team per colmare il divario verso il design inclusivo, per rendere gli spazi e i servizi accessibili, funzionali e utilizzabili dalle persone con limitazioni visive.

Lo scopo della ricerca è quello di supportare lo sviluppo del robot autonomo BUDD-e in termini tecnico-informatici, tecnologici, gestionali e spaziale, affinché possa assumere il ruolo di guida per le persone con limitazioni visive, consentendo loro la fruizione dei servizi offerti. Verranno applicati principi di progettazione incentrata sull’utente (Mosca *et al.*, 2019b) a supporto dell’accessibilità ai luoghi (esterni e interni) a fruizione pubblica, dove il robot guida BUDD-e eserciterà un ruolo determinante per consentire l’accessibilità ed il raggiungimento delle destinazioni desiderate.

### **Research Method**

Il Progetto di Ricerca BUDD-e – tuttora in corso di sviluppo (Marzo 2022 - Giugno 2023) – dal punto di vista metodologico, è stato suddiviso in quattro step principali: Analisi del contesto; Progettazione e realizzazione di un prototipo di guida robotica; Sperimentazione nell’ambito di due differenti casi studio; Validazione, scalabilità e sfruttamento dei risultati.

### **Analisi del contesto**

Sulla base di un’indagine preliminare e di una discussione con le parti interessate come il Consiglio Regionale Lombardo dell’Unione Italiana dei Ciechi e degli Ipovedenti (UICI)<sup>1</sup> e la Fondazione Istituto dei Ciechi di Milano (ICM) ONLUS<sup>2</sup>, il gruppo di ricerca ha individuato quattro aree target di intervento, rivolte sia ai bisogni primari (luoghi per l’assistenza sanitaria ed il benessere, ovvero orientamento nelle strutture

guide for BVI people, allowing them to use the services offered. User-centred design principles (Mosca *et al.*, 2019b) will be applied to support accessibility to public (outdoor and indoor) places where the robot guide BUDD-e will be a primary feature in ensuring accessibility and reaching the desired destinations.

### **Research Method**

The BUDD-e research experience is in progress (March 2022 - June 2023), and from a methodological point of view, it is divided into four main steps: Context analysis; Design and creation of a robot guide prototype; Experimentation within two different case studies; Validation & Exploitation of the results.

### **Context analysis**

Based on a preliminary investigation and discussion with stakeholders,

like Consiglio Regionale Lombardo dell’Unione Italiana dei Ciechi e degli Ipovedenti (UICI)<sup>1</sup> and Fondazione Istituto dei Ciechi di Milano (ICM) ONLUS<sup>2</sup>, the research group identified four target areas of intervention, addressing both primary needs (healthcare and well-being, i.e. wayfinding in healthcare facilities and training in sports centres), and secondary needs (navigation in shopping centres and cultural centres/museums). Interviews, focus groups, market analysis, and literature reviews about the application scenarios identified thanks to UICI and ICM are crucial to highlight the opportunities for spatial improvement in terms of inclusiveness and accessibility, with focus on BVI’s needs, to build understanding, awareness, and motivation not only about the potentialities of the project, but also about its realistic objectives and limits.

sanitarie e formazione nei centri sportivi) sia ai bisogni secondari (navigazione all'interno dei centri commerciali e dei centri culturali/musei).

Interviste, focus group, analisi di mercato e revisioni della letteratura sugli scenari applicativi individuati grazie a UICI e ICM, sono fondamentali per evidenziare le opportunità di miglioramento degli spazi in termini di inclusività e accessibilità, con focus sui bisogni di BVI, per portare comprensione, consapevolezza e motivazione non solo sulle potenzialità del progetto, ma anche sui suoi realistici obiettivi e limiti.

UICI, ICM, DISABILINCORSA ONLUS<sup>3</sup>, ed il Gruppo Sportivo Dilettantistico GSD Non Vedenti Milano (NVM) ONLUS<sup>4</sup>, hanno avuto un ruolo determinante nella definizione delle aree che richiedono un intervento urgente e le azioni obbligatorie da intraprendere, con attenzione alle potenzialità ed ai bisogni di un robot guida. ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda<sup>5</sup>, Azienda Servizi alla Persona (ASP) Golgi Redaelli<sup>6</sup> e Tactile Vision ONLUS<sup>7</sup> rappresentano il punto di vista degli erogatori (providers) dei suddetti servizi e degli esperti di architettura, ed avranno pertanto un ruolo strategico sia per la caratterizzazione gli spazi in analisi, sia per la definizione dei vincoli costruttivi e finanziari da rispettare. Per tutti gli scenari applicativi, si stanno concludendo le fasi di definizione delle caratteristiche tipologiche, spaziali, funzionali, lo studio dei flussi e dei vincoli ottimali relativi all'accessibilità degli spazi, comprese le esigenze di *wayfinding*, orientamento e segnalistica. Lo scopo principale di questa importante *Work Package* iniziale è quello di sviluppare sia i principi di progettazione architettonica, che le opportunità (alternative spaziali) delle guide robot.

UICI, ICM, DISABILINCORSA ONLUS<sup>3</sup>, and Gruppo Sportivo Dilettantistico GSD Non Vedenti Milano (NVM) ONLUS<sup>4</sup> played a key role underlining the areas that require urgent intervention and the mandatory actions to be undertaken, with focus on the roles of a robot guide. ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda<sup>5</sup>, Azienda Servizi alla Persona (ASP) Golgi Redaelli<sup>6</sup>, and Tactile Vision ONLUS<sup>7</sup> are bringing the perspective of the aforementioned service providers and architectural experts. They will play a crucial role both in characterising spaces under analysis and in defining the constructive and financial constraints to be complied with. For all the application scenarios, the Authors are concluding the definition phases of the optimal typological, spatial, functional characteristics, flows and constraints related to the ac-

cessibility of the spaces, including wayfinding and signage needs. The main purpose of this working package is to develop both the architectural design principles and the spatial opportunities/alternatives of robot guides.

#### *Design and creation of a robot guide prototype*

Creation of the smart tether system for user-robot interaction. Design of a navigation software, considering the goals defined for the robot, interactions with the user via the smart tether, data from wearable sensors, and obstacles. It will be implemented in ROS (i.e. a standard operating system in Robotics) to leverage on the components already available from the ROS community, but also to distribute all the software developed as an open source component. The navigation software will be easily adaptable to dif-

#### *Progettazione e realizzazione di un prototipo di guida robotica*

Realizzazione del sistema *smart tether* per l'interazione utente-robot. Progettazione di un software di navigazione, considerando gli obiettivi del robot, le interazioni con l'utente tramite lo *smart tether*, i dati dei sensori indossabili e gli ostacoli che potrebbero presentarsi sul percorso. Il Sistema sarà implementato in ROS (i.e., *Standard Operating system in Robotics*) per sfruttare i componenti già disponibili dalla comunità ROS, ma anche per distribuire il *software* sviluppato come componente *open source*. Il *software* di navigazione sarà facilmente adattabile a diverse piattaforme *ROS-compliant*. Il robot selezionato per gli esperimenti sarà YAPE, un droide autonomo a due ruote prodotto da YAPE S.r.l.<sup>8</sup> e reso disponibile al gruppo di ricerca.

#### *Sperimentazione su un caso studio avente funzione socio-sanitaria*

Identificazione dei bisogni specifici dei pazienti con limitazioni visive (anche mediante il supporto di UICI e ICM) e definizione delle possibili necessarie modifiche architettoniche degli spazi nell'ambito del principale caso studio (*indoor*) individuato dal gruppo di ricerca: ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda. In questo contesto, va sottolineato che una struttura socio-sanitaria quale un ospedale poli-specialistico è uno degli edifici più complessi che potrebbero essere presi in considerazione (Brambilla *et al.*, 2019); il rapporto tra utenti ed ospedale è notoriamente complesso, soprattutto in relazione alla situazione fisica ed emotiva degli utenti, con impatti rilevanti sulla loro capacità di orientarsi all'interno dell'architettura (Capolongo *et al.*, 2014). Un ospedale dovrebbe accogliere gli utenti e dare loro le garanzie necessarie che si aspettano da una struttura sani-

ferent ROS-compliant platforms. The robot selected for the experiments will be YAPE, a two-wheeled autonomous droid produced by YAPE S.r.l.<sup>8</sup> and made available to the research team.

#### *Experimentation on healthcare facilities – a case study*

Identification of the specific needs of BVI patients (thanks to UICI and ICM), and definition of the required/possible architectural modifications to spaces inside the main healthcare (*indoor*) case study part of the research group: the "ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda" Hospital. In this context, it should be underlined that a healthcare facility is one of the most complex buildings that could be taken into consideration (Brambilla *et al.*, 2019). Indeed, the relationship between users and the hospital is very intricate, especially in relation to users'

emotional involvement, their physical and emotional orientation and, in most cases, it is affected by their condition, particularly for patients (Capolongo *et al.*, 2014). A hospital should welcome users and give them the necessary guarantees they expect from a healthcare facility: precisely, humaneness, treatment, and safety (Capolongo *et al.*, 2016). In a hospital, the capability to help users not lose their own identity, and to assist them in dealing with their impaired psycho-physical condition is crucial, and is achieved by establishing relations between the structure and the territorial context in a perspective of collaboration, social inclusion and participation (Capolongo *et al.*, 2015). Moreover, strong attention to hospital spaces can have an important effect on user trust (Buffoli *et al.*, 2015). For all the reasons cited above, the customisation of the robotic guide to perform

taria: umanità, cure e sicurezza (Capolongo *et al.*, 2016). In un ospedale è fondamentale essere capaci di supportare gli utenti a non perdere la propria identità e aiutarli ad affrontare la propria condizione psico-fisica compromessa, instaurando relazioni tra la struttura e il contesto territoriale in un'ottica di collaborazione, inclusione sociale e partecipazione (Capolongo *et al.*, 2015). Inoltre, una forte attenzione agli spazi ospedalieri può avere un effetto importante sulla fiducia degli utenti (Buffoli *et al.*, 2015); per tutti i motivi sopra citati, la personalizzazione della guida robotica – per svolgere le attività di orientamento e accompagnamento dei pazienti con limitazioni visive – diviene cruciale. L'indagine presso ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda (Giugno/Luglio 2022) ha consentito di prendere consapevolezza degli spazi (Fig. 1) che ospiteranno la prima applicazione pilota del progetto BUDD-e, con particolare riferimento: al Padiglione 1 (Fig. 2) che rappresenta il principale “gate” di accesso/ingresso al complesso ospedaliero; al Blocco Nord (Fig. 3), nell'ambito del quale è stato concordato che la sperimentazione riguarderà il “punto prelievi” sito al piano terra dello stesso; al Blocco Sud (Fig. 4), che ospita la seconda ed ultima funzione sanitaria che viene considerata quale destinazione degli utenti interessati dalla sperimentazione, ovvero gli “ambulatori di cardiologia”. Punto prelievi e ambulatori di cardiologia, sono stati definiti – in collaborazione alle Direzioni Sanitaria e Strategica dell’Ospedale Niguarda – le due funzioni sanitarie a maggior fruizione da parte di utenti ciechi/Ipovedenti.

*Sperimentazione su un caso studio avente funzione sportiva*  
Analisi del contesto sportivo individuato per la sperimentazione nella seconda architettura (outdoor) a fruizione pubblica,

indoor wayfinding functionalities is of the utmost importance.

The investigation at the “ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda” Hospital (June/July 2022) allowed to gain awareness of the spaces (Fig. 1) that will host the first pilot application of the BUDD-e project, with particular reference to: Pavilion 1 (Fig. 2), which is the main access/entrance “gate” to the healthcare area; to the North Block (Fig. 3), in the context of which it was agreed that the experimentation will concern the “withdrawal point” located on the ground floor of the same; to the South Block (Fig. 4), which houses the second and last sanitary function, which is considered the destination of users involved in the experimentation, i.e. the “cardiology clinics”. Blood sampling point and cardiology clinics, the two health functions most used by BVI users, were defined, in collaboration

with the Health and Strategic Departments of the Niguarda Hospital.

#### *Experimentation on a sports centre - case study*

Analysis of the sporting context identified for the experimentation within the second (outdoor) architecture of public fruition, specifically on the athletics track of the Giuriati Sports Field of the Politecnico di Milano (PolimiSPORT). The investigation at the Giuriati Sport Center (July 2022) was conducted in the presence of the DEIB-POLIMI Colleagues engaged in the first tests of technological operation. The investigation allowed to first evaluate all the methods of use of the athletics track (Fig. 5): lane 1 vs lane 6; the latter option was considered more disadvantageous than the first, since, even if closer to the direct exits from the changing rooms (Fig. 6), it would form a break

ovvero la pista di atletica leggera del Campo Sportivo Giuriati del Politecnico di Milano (PolimiSPORT).

L'indagine presso Giuriati Sport Center (Luglio 2022) si è svolta in concomitanza con la presenza dei Colleghi del Dipartimento DEIB del Politecnico di Milano impegnati nelle prime prove di operatività tecnologica. I sopralluoghi hanno consentito di valutare innanzitutto le modalità di utilizzo della pista di atletica (Fig. 5): corsia 1 vs corsia 6; quest'ultima opzione è stata ritenuta più svantaggiosa rispetto la prima, in quanto, anche se maggiormente prossima alle uscite dirette dagli spogliatoi (Fig. 6), rappresenterebbe una cesura per gli altri utenti che necessiterebbero di accedere alla pista di atletica.

La guida del robot verrà opportunamente personalizzata in base sia alle esigenze degli sportivi e degli atleti con limitazioni visive (anche attraverso interviste e grazie a UICI, ICM, DISABILINCORSA, NVM), sia per merito della integrazione con guide esperte (dialogo con DISABILINCORSA), ed ai programmi di formazione *ad hoc*. Saranno monitorati i parametri bio-mecanici e saranno caratterizzati i loro profili standard/ottimali. In questo contesto outdoor, la sperimentazione diventa ancor più importante in quanto rappresenta l'occasione per favorire l'adozione di corretti stili di vita, ovvero la promozione di attività fisica per ridurre la possibilità di insorgenza di malattie cronico-degenerative (NCD's) che sono fortemente comuni nelle persone con limitazioni visive, causa della vita sedentaria che conducono.

Lo studio condotto ha evidenziato numerose limitazioni, negli spazi attualmente considerati come scenari applicativi, in termini di accessibilità. È stato rilevato che tali spazi sono di difficile vivibilità da parte di utenti ciechi e ipovedenti (special-

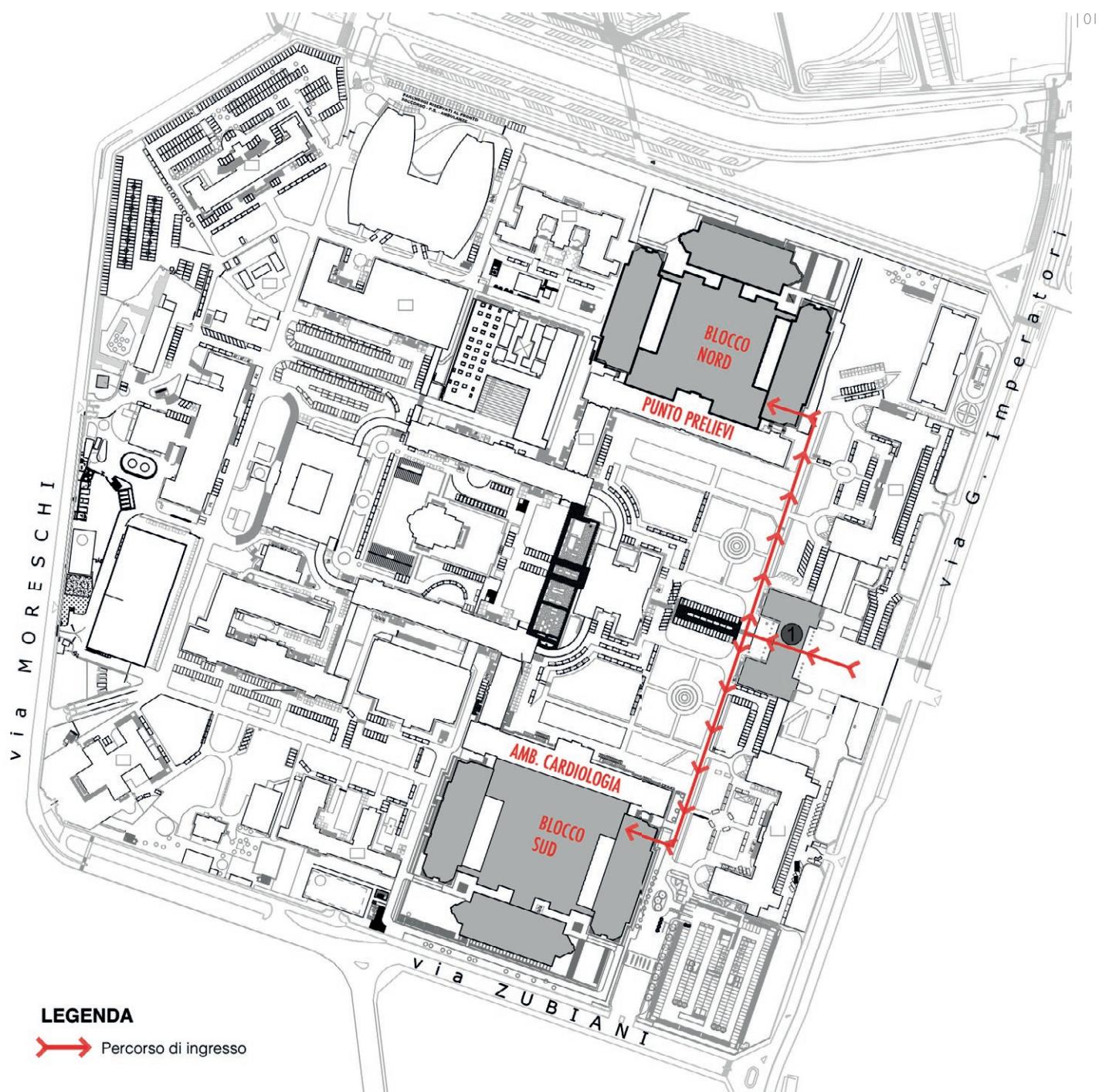
for other users needing to access the athletics track.

The robot-guided method will be appropriately customised according to both the needs of sportsmen and athletes with visual limitations (through interviews and thanks to UICI, ICM, DISABILINCORSA, NVM), and the behaviour of expert guides (dialogue with DISABILINCORSA), and *ad-hoc* training programmes. Biomechanical parameters will be monitored, and their standard/optimal profiles will be characterised. In this outdoor context, the experimentation becomes increasingly important because it is an opportunity to foster healthy lifestyles, promoting physical activity to reduce the possible onset of Non-Communicable Diseases (NCD's) that are common in the BVI people due to the sedentary life they lead. The study conducted highlighted numerous limitations in terms of acces-

sibility in the spaces currently considered as application scenarios. It has been found that these spaces are difficult to live in for BVI users (especially if they are autonomous), and that there are many sources of danger, especially in the context of the “ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda” Hospital where open spaces are shared with cars. Privileged paths for the project's case studies are, therefore, being defined, where the guiding robot and the user will be able to move safely. Changes relating to spaces leading to these routes and to the routes themselves are being studied to enhance their accessibility and visibility.

#### *Validation & Exploitation*

Experiments to validate the design principles and to test the robot's functions in the Giuriati Sport Center and in the Niguarda Hospital are scheduled



for the first months of 2023, thanks to the participation of visually impaired volunteers recruited by partner associations.

Further research steps will include the definition of an economic sustainability plan and communication/marketing strategies for the commercialisation of BUDD-e for use in the application contexts; the patenting of the novel smart tether system; the analysis of potential future BUDD-e application, like

navigation in shopping centres and museums/cultural places (thanks to Tactile Vision); and networking with a potential future different target group (recovery, rehabilitation, and mobility of elderly patients, thanks to ASP Golgi Redaelli).

#### Preliminary outcomes, social importance and research outlooks

The 2006 ONU Convention on the Rights of Persons with Disabilities

proposes guidelines for the creation of an inclusive society. In line with this, BUDD-e proposes appropriate measures to ensure BVI people: improvements in their psycho-physical condition (e.g. greater autonomy and independence, higher self-esteem, better confidence, and less physical and mental fatigue) to develop the ability to actively decide about their daily lives; greater awareness of their needs and attitudes, encouraging recovery

from the sense of immobility, discomfort – by feeling different and a burden to others – and passivity caused by the pandemic period; greater accessibility to environments within the city context; greater integration in the social context by breaking down architectural and cultural barriers.

The beneficiaries of BUDD-e will go well beyond BVI people, with a positive impact on caregivers, as this technology reduces the need for support and

mente se in autonomia) e che le sorgenti di pericolo sono molteplici, specialmente nell'ambito del ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda dove gli spazi all'aperto sono condivisi con automobili. Sono quindi in via di definizione dei percorsi privilegiati per i casi di studio del progetto, dove il robot guida e l'utente potranno muoversi in sicurezza; sono in fase di studio modifiche relative agli spazi per e a questi percorsi per aumentarne l'accessibilità e la visibilità.

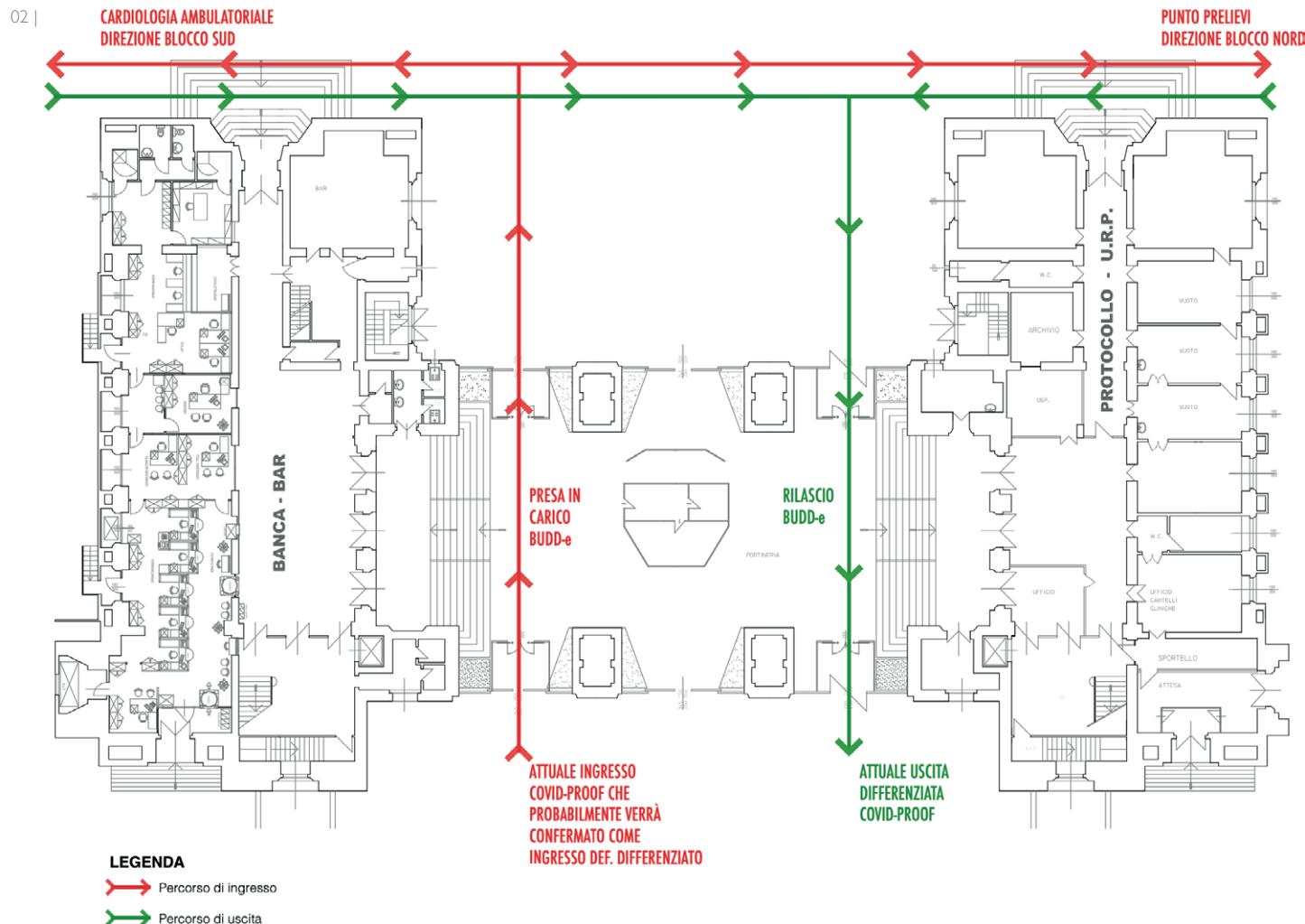
#### Validazione, scalabilità e sfruttamento dei risultati

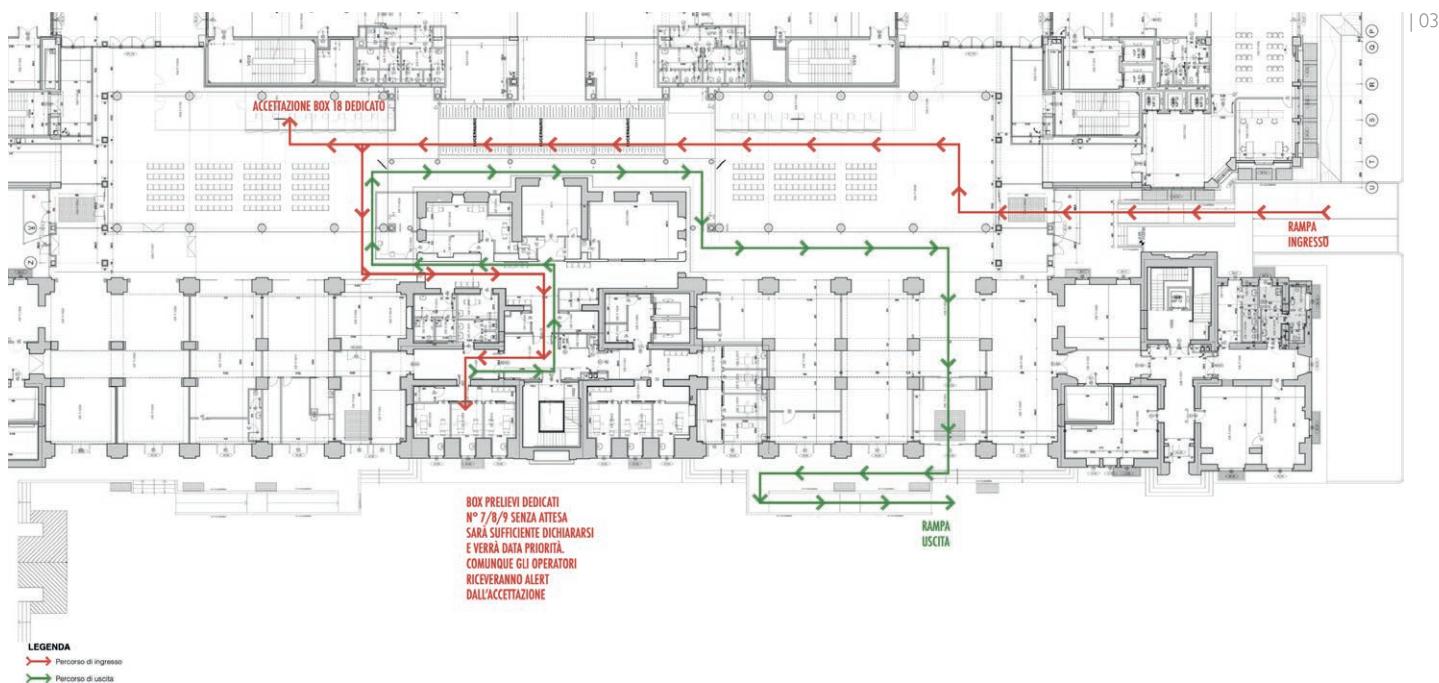
Le sperimentazioni per validare i principi di progettazione e per testare le funzionalità del robot BUDD-e nel centro sportivo Giuriati e nell'Ospedale Niguarda, sono programmate per i mesi di Giugno e Luglio 2023, grazie alla partecipazione di volontari con limitazioni visive, reclutati nell'ambito della disponibilità delle Associazioni partner.

Ulteriori step di ricerca si concretizzano nella definizione di un piano di sostenibilità economica e strategie di comunicazione/marketing per la commercializzazione di BUDD-e da implementare nei contesti applicativi; il brevetto del nuovo sistema *smart tether*; l'analisi di potenziali future applicazioni BUDD-e, come la navigazione in centri commerciali e luoghi culturali/museali (grazie alla collaborazione in corso con Tactile Vision ONLUS); ed infine merito del networking con potenziali futuri target group (recupero, riabilitazione e mobilità dei pazienti anziani, grazie alla collaborazione in corso con ASP Golgi Redaelli).

#### Risultati preliminari, rilevanza sociale e prospettive di ricerca

La Convenzione ONU del 2006 sui diritti delle persone con disabilità propone linee guida per la realizzazione di una società inclusiva. In coerenza con questa direttiva comu-





nitaria, BUDD-e propone misure appropriate per garantire alle persone con limitazioni visive: miglioramenti delle condizioni psicofisiche (es. maggiore autonomia e indipendenza, maggiore autostima, maggiore fiducia e minore affaticamento fisico e mentale) per sviluppare la capacità decidere attivamente sulla propria vita quotidiana; una maggiore consapevolezza dei propri bisogni e atteggiamenti, favorendo il recupero dal senso di immobilità, disagio e dalla passività causata dal periodo della pandemia trascorso; maggiore accessibilità agli ambienti all'interno del contesto urbano; una maggiore integrazione nel contesto sociale abbattendo le barriere architettoniche e culturali.

daily assistance, and on people without disabilities, raising awareness on topics like "diversity" and promoting solidarity and a truly inclusive society. BUDD-e will benefit not only individuals, but also the community from an economic and social perspective. It will encourage better access to resources and public activities through fairer and more accessible proposals for their customers. Improvements are expected in both citizen services (better customer experience within supermarkets, hospitals, museums, and sports centres), and cities, towards more liveable, and accessible neighbourhoods. The impact of the BUDD-e project lies at the intersection of two challenges of the 2030 Agenda, i.e. ensuring healthy lives and promoting well-being for all, and reducing inequalities by empowering and promoting the inclusion of

vulnerable persons with disabilities. Moreover, the social impact of the project will be divided into two macro-dimensions, aiming to quantify – first of all – personal and social recovery of individuals and, secondly, economic recovery at community level compared to the situation created by the Pandemic. At individual level, the main outcomes will be related to topics and aspects like social capital (social participation, level of interpersonal trust, satisfaction with family and friendship relationships), health (physical and psychological status), safety (mobility-related accident), and subjective well-being (satisfaction with personal life, perceived wellness). At community level, important indirect outcomes will be visible in the following fields: quality of services (infrastructure accessibility, services for citizens, place attachment) and healthy lifestyle promotion, like contrasting

I beneficiari di BUDD-e andranno ben oltre le persone con limitazioni visive, sino a raggiungere impatti positivi sui caregiver, in funzione del fatto che questa tecnologia riduce la necessità di supporto e assistenza quotidiana, sensibilizzando la popolazione su tematiche quali la "diversità" e promuovendo solidarietà ed inclusione sociale.

BUDD-e porterà benefici non solo a livello individuale, ma anche economici e sociali a livello collettivo, di comunità. Incoraggerà un migliore accesso alle risorse e alle attività pubbliche, attraverso proposte più eque e accessibili per i propri utilizzatori. Sono attesi miglioramenti sia nei servizi al cittadino (migliore esperienza del fruitore all'interno di supermercati, ospedali,

physical inactivity and promoting walkability).

BUDD-e can generate a high social and economic impact that becomes important through the interaction of multidisciplinary partners, and thanks to the potential users involved in studying the project with interviews, questionnaires, focus groups, and in the physical experimentation under development.

The benefits developed through the project will be measured through the Social Return On Investment (SROI) model applied to Pilot Cases "ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda" Hospital and Giurati Sport Center. The main steps for the calculation of the SROI will be carried out through the analysis of literature, specific meetings with partners, and interviews with key stakeholders.

At the end of the activities, the results

of the project (methods, environments, and technologies) can be used by other stakeholders both in their completeness, but also considering the different components separately. The model developed will, therefore, be exportable and will support other places and architectures to achieve more modern and accessible paradigms.

#### ACKNOWLEDGMENT AND AUTHOR'S RIGHTS

Multi-disciplinarity lies at the core of the Polisocial Award 2021 research project. BUDD-e addresses, for the first time, the design of inclusive living spaces for blind and visually impaired persons through a unitary and comprehensive approach.

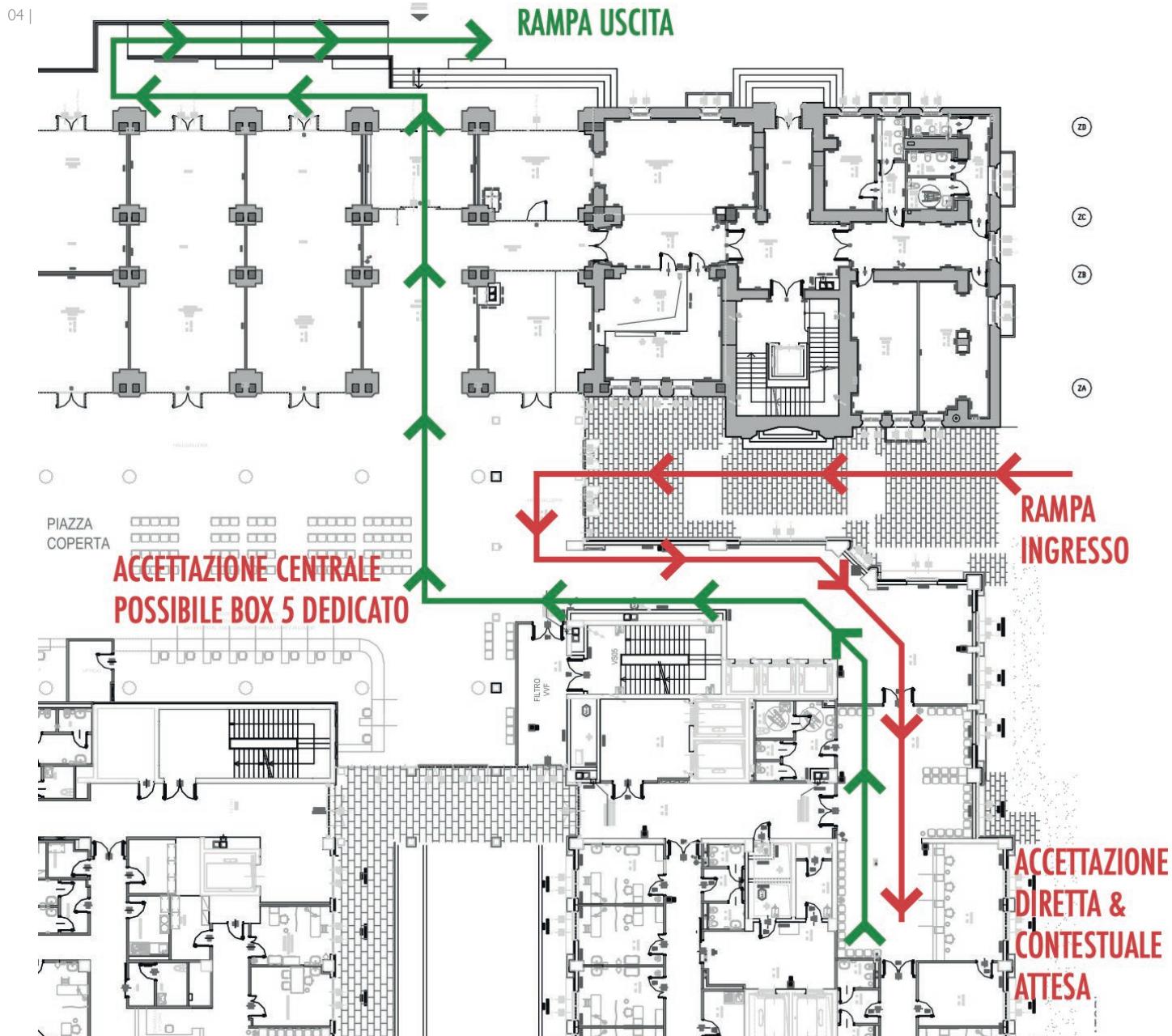
This ambitious goal is being developed through an innovative synergistic research blending ICT, Automation, Design, and Architecture; the Politecnico di

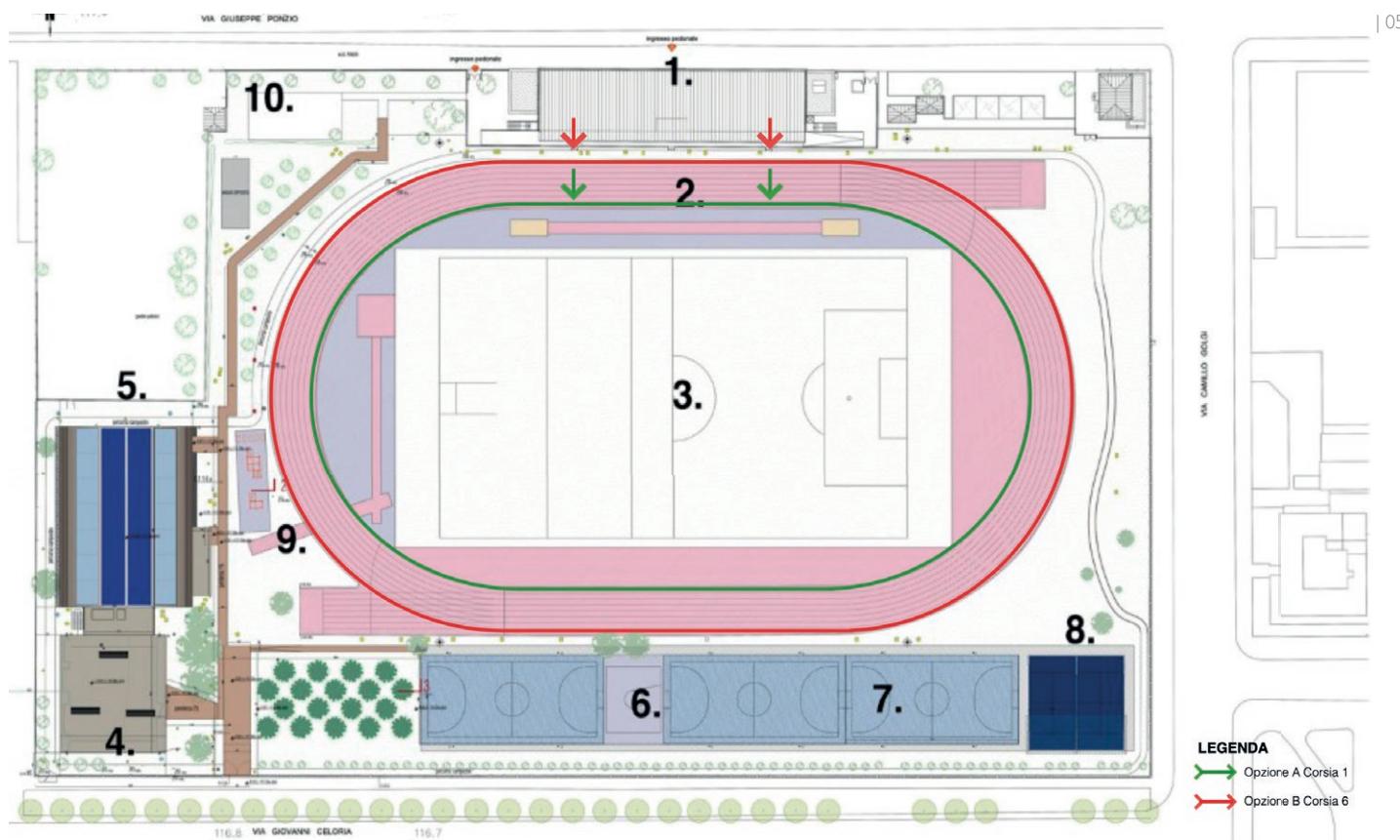
musei, centri sportivi), sia nelle città, traguardando quartiere maggiormente vivibili e accessibili.

L'impatto del progetto BUDD-e potrebbe essere collocato nell'intersezione di due sfide dell'Agenda 2030, ovvero garantire una vita sana, promuovendo il benessere per tutti e ridurre le disuguaglianze rafforzando e promuovendo l'inclusione delle persone vulnerabili con disabilità.

Inoltre, l'impatto sociale del progetto sarà suddiviso in due macro-dimensioni, con l'obiettivo di quantificare – in primo luogo – il recupero personale e sociale degli individui, e in secondo luogo il recupero economico a livello comunitario rispetto la situazione creata dalla pandemia.

A livello individuale, i principali risultati saranno riferiti ad aspetti quali: capitale sociale (partecipazione sociale, livello di





fiducia interpersonale, soddisfazione per le relazioni familiari e di amicizia), salute (stato fisico e psicologico), sicurezza (infortunio legato alla mobilità) e benessere soggettivo (soddisfazione per la vita personale, benessere percepito).

A livello di comunità, i risultati indiretti rilevanti saranno visibili nei seguenti ambiti: qualità dei servizi (accessibilità delle

infrastrutture, servizi per i cittadini, attaccamento al luogo) e promozione di stili di vita sani, come contrasto dell'inattività fisica e promozione della camminabilità.

BUDD-e potrà generare un elevato impatto sociale ed economico, che diventa rilevante attraverso l'interazione dei partner multidisciplinari e grazie ai potenziali utenti coinvolti nel-

Milano Departments involved are Architecture, Built environment and Construction engineering (DABC), Electronics, Information and Bioengineering (DEIB), Design (DESIGN) and Management, economics and industrial engineering [DIG]. The Professors involved are:

- Marcello Farina, Scientific referee and expert in Control system design, mobile robotics;
- Emanuele Lettieri, Project Manager and expert in Management, acceptance of digital and assistive technologies in healthcare;
- Giuseppe Andreoni, expert in User experience and wearable sensors;
- Luca Bascetta, expert in Mobile and autonomous robotics, ROS programming;
- Matteo Corno, expert in Control of autonomous vehicles, control system integration;
- Manuela Galli, expert in Functional

assessment, motor rehabilitation, and smart sports infrastructures,

- Paolo Perego, expert in User experience, wearable sensors, Bioengineering;
- Andrea Rebecchi, expert in orientation and wayfinding – with particular reference to healthcare infrastructures – and in the definition of design strategies for accessibility of both outdoor and indoor spaces.

#### NOTES

<sup>1</sup> Consiglio Regionale Lombardo dell'Unione Italiana dei Ciechi e degli Ipovedenti (UICI) ONLUS-APS, founded in 1920 and with more than 47,000 associates in Italy, promotes the emancipation and integration of BVI persons.

<sup>2</sup> Fondazione Istituto dei Ciechi di Milano (ICM) ONLUS, founded in 1840, operates for the full integration of BVI persons in society, fostering

their autonomy and promoting their personal ambitions.

<sup>3</sup> DISABILINCORSA ONLUS has the goal of promoting sports (with special focus on running) as a means of fostering aggregation and solidarity, besides raising the social status of disabled persons.

<sup>4</sup> Gruppo Sportivo Dilettantistico GSD Non Vedenti Milano (NVM) ONLUS has fostered, for more than 40 years, sports activities for BVI persons by organising courses, public events, and competitions.

<sup>5</sup> ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda is one of the largest hospitals in Milan, and is one of the selected application scenarios considered in BUDD-e.

<sup>6</sup> Azienda Servizi alla Persona (ASP) Golgi Redaelli has longstanding history in contributing to the well-being of the community by dealing with geriatric care and treatment of degen-

erative diseases. This important institution will contribute to making the most of the project by providing an application scenario and physical spaces to analyse the impact of wayfinding, rehabilitation, and mobility in residential centres for elderly people.

<sup>7</sup> Tactile Vision ONLUS is a non-profit association that operates in the field on inclusive communication in line with Universal Design principles. In particular, this association will share with us its expertise about the design of tools to improve the access of BVI persons especially to museums, and cultural events.

<sup>8</sup> YAPE S.r.l. is part of the e-Novia group, spinoff of Politecnico di Milano. YAPE is currently classified as a self-driving last-mile delivery system. YAPE shares its expertise in the design and implementation of mobile autonomous robots that must be deployed in shared spaces.

lo studio del progetto attraverso interviste, questionari, focus group e nella sperimentazione fisica in corso di sviluppo. I benefici sviluppati attraverso il progetto saranno misurati attraverso il modello *Social Return On Investment* (SROI) applicato ai casi pilota ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda e Giuriati Sport Center. Attraverso l'analisi della letteratura, incontri specifici con i partner e interviste con i principali stakeholder, verranno eseguiti i passaggi fondamentali per il calcolo dello SROI.

Al termine delle attività, i risultati del progetto (metodi, ambienti e tecnologie) possono essere utilizzati da altri *stakeholder* sia nella loro completezza, ma anche considerando separatamente le diverse componenti. Il modello sviluppato sarà quindi esportabile e supporterà altri luoghi e architetture verso paradigmi più moderni e accessibili.

#### Riconoscimenti e diritti d'autore

La multidisciplinarietà è al centro del progetto di ricerca Polisocial Award 2021. BUDD-e si rivolge, per la prima volta, alla progettazione di spazi abitativi inclusivi per non vedenti e ipovedenti, attraverso un approccio unitario e globale.

Questo ambizioso obiettivo viene sviluppato attraverso una ricerca sinergica innovativa che unisce ICT, Automazione, Design e Architettura; i Dipartimenti del Politecnico di Milano coinvolti sono Architettura, Ingegneria delle costruzioni e ambiente costruito (DABC), Elettronica, Informatica e Bio-ingegneria (DEIB), Design (DESIGN) ed Ingegneria Gestionale

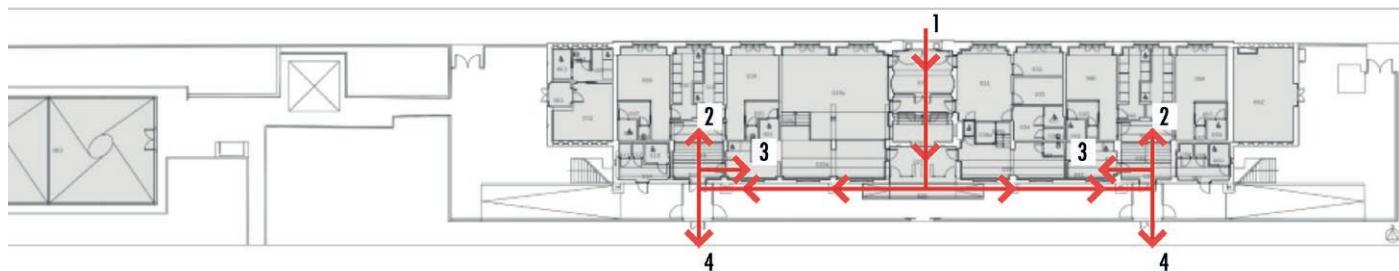
(DIG). I Professori coinvolti sono:

- Marcello Farina, Referente scientifico ed esperto di Progettazione di sistemi di controllo e di robotica mobile;
- Emanuele Lettieri, *Project Manager* ed esperto in *Management*, accettazione di tecnologie digitali e assistive in ambito sanitario;
- Giuseppe Andreoni, esperto in *User experience* e sensori indossabili;
- Luca Bascetta, esperto in Robotica mobile e autonoma, programmazione ROS;
- Matteo Corno, esperto in Controllo di veicoli autonomi, integrazione di sistemi di controllo;
- Manuela Galli, esperta in Valutazione funzionale, riabilitazione motoria e infrastrutture sportive intelligenti,
- Paolo Perego, esperto in *User experience*, sensori indossabili, Bioingegneria; e
- Andrea Rebecchi, esperto in orientamento e *wayfinding* – con particolare riferimento alle strutture socio-sanitarie – e definizione delle strategie progettuali per l'accessibilità sia dei luoghi *outdoor*, che degli spazi *indoor*.

#### NOTE

<sup>1</sup> Consiglio Regionale Lombardo dell'Unione Italiana dei Ciechi e degli Ipovedenti (UICI) ONLUS-APS, fondata nel 1920 e con più di 47000 associati in Italia, promuove l'emancipazione e l'integrazione degli utenti BVI.

<sup>2</sup> Fondazione Istituto dei Ciechi di Milano (ICM) ONLUS, fondata nel 1840, opera per la piena integrazione degli utenti BVI nella società, favorendone l'autonomia e promuovendone le ambizioni personali.



1. INGRESSO PRINCIPALE ALL'EDIFICIO 36
2. SPOGLIATORI M/F
3. SPOGLIATORI DIVERSAMENTE ABILI M/F
4. ACCESSO DEDICATO ALLA PISTA DI ATLETICA

#### LEGENDA

→ Percorso di ingresso

<sup>3</sup> DISABILINCORSA ONLUS ha l'obiettivo di promuovere lo sport (con particolare attenzione alla corsa) come veicolo di aggregazione, solidarietà e per elevare la condizione sociale delle persone con disabilità.

<sup>4</sup> Gruppo Sportivo Dilettantistico GSD Non Vedenti Milano (NVM) ONLUS promuove, da più di 40 anni, attività sportive per gli utenti BVI organizzando corsi, eventi pubblici e competizioni.

<sup>5</sup> ASST Grande Ospedale Metropolitano Niguarda è uno dei maggiori ospedali milanesi ed è uno degli scenari applicativi di BUDD-e.

<sup>6</sup> Azienda Servizi alla Persona (ASP) Golgi Redaelli ha una lunga storia nel contribuire al benessere della comunità occupandosi di assistenza geriatrica e cura delle malattie degenerative. Questa importante istituzione contribuirà allo sfruttamento del progetto, fornendo uno scenario applicativo e spazi fisici per l'analisi dell'impatto dell'orientamento, della riabilitazione e della mobilità nei centri residenziali per anziani.

<sup>7</sup> Tactile Vision ONLUS è un'Associazione no-profit che opera nel campo della comunicazione inclusiva in linea con i principi dell'*Universal Design*. In particolare, questa Associazione condividerà la propria esperienza nella progettazione di strumenti per migliorare l'accesso degli utenti BVI in particolare ai musei e agli eventi culturali.

<sup>8</sup> YAPE S.r.l. fa parte del gruppo e-Novia, *spin-off* del Politecnico di Milano. YAPE è attualmente classificato come un sistema di consegna dell'ultimo miglio a guida autonoma; YAPE condivide la sua esperienza nella progettazione e realizzazione di robot mobili autonomi capaci di muoversi in spazi condivisi.

## REFERENCES

- Accenture (2019), "All in: Inclusion and Diversity drive shopper habits", available at: [https://www.accenture.com/\\_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/Secure/pdf-no-index-3/Accenture-Inclusion-and-Diversity-in-Retail.pdf#zoom=50](https://www.accenture.com/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/Secure/pdf-no-index-3/Accenture-Inclusion-and-Diversity-in-Retail.pdf#zoom=50)
- Brambilla, A. et al. (2019), "Evidence Based Hospital Design. A literature review of the recent publications about the EBD impact of built environment on hospital occupants' and organizational outcomes", *Annali di Igiene*, Vol. 31, n. 2, pp. 165-180.
- Buffoli, M. et al. (2015), "Healthcare sustainability evaluation systems", in Capolongo, S., Bottero, M.C., Buffoli, M., Lettieri, E. (Eds.), *Improving Sustainability During Hospital Design and Operation: A Multidisciplinary Evaluation Tool*, Springer, pp. 23-30.
- Capolongo, S. et al. (2014), "Soft qualities in healthcare. Method and tools for soft qualities design in hospitals' built environments", *Annali di igiene: medicina preventiva e di comunità*, Vol. 26, n. 4, pp. 391-399.
- Capolongo, S. et al. (2015), "Healthcare sustainability challenge", in Capolongo, S., Bottero, M.C., Buffoli, M., Lettieri, E. (Eds.), *Improving sustainability during hospital design and operation: A multidisciplinary evaluation tool*, Springer, pp. 1-10.
- Capolongo, S. et al. (2016), "Social sustainability in healthcare facilities: a rating tool for analyzing and improving social aspects in environments of care", *Ann. Istituto Superiore Sanità*, Vol. 52, n. 1, pp. 15-23.
- Capolongo, S. et al. (2020), "COVID-19 and cities: From urban health strategies to the pandemic challenge. a decalogue of public health opportunities", *Acta Biomedica*, Vol. 91, n. 2, pp. 13-22.
- Chuang, T.K. et al. (2018), "Deep Trail-Following Robotic Guide Dog in Pedestrian Environments for People who are Blind and Visually Impaired – Learning from Virtual and Real Worlds", *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5849-5855,
- Elgendi M. et al. (2019), "Making shopping easy for people with visual impairment using mobile assistive technologies", *Applied Science*, Vol. 9, n. 6, p. 1061.
- Guerreiro, J. et al. (2019a), "Airport accessibility and navigation assistance for people with visual impairments", *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Paper 16.
- Guerreiro, J. et al. (2019b), "CaBot: Designing and evaluating an autonomous navigation robot for blind people", *Proceedings of ASSETS '19 Conference*, p. 68-82.
- Hersh, M.A. et al. (2012), "A robotic guide for blind people Part 2: gender and national analysis of a multi-national survey and the application of the survey results and the CAT model to framing robot design specifications", *Applied bionics and biomechanics*, Vol. 9, pp. 29-43.
- Kulkarni, A. et al. (2016), "Robotic assistance in indoor navigation for people who are blind", *11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 461-462.
- Manduchi R. et al. (2011), "Mobility-related accidents experienced by people with visual impairment", *Insight: Research and practice in visual impairment and blindness*, Vol. 4, n. 2, pp. 44-54.
- Mosca, E.I. et al. (2019), "Inspiring architects in the application of design for all: Knowledge transfer methods and tools", *Journal of Accessibility and Design for All*, Vol. 9, n. 1, pp. 1-24.
- Mosca, E.I. et al. (2019b), "Evaluating a proposed design for all (DfA) manual for architecture", *Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Design for Inclusion*, in *Advances in Design for Inclusion*, Springer, pp. 54-64.
- Tobita, K. et al. (2017), "Examination of a guidance robot for visually impaired people", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 29, n. 4, pp. 720-727.
- U.S. Department of Justice (1990; 2008), "USA's Americans with Disabilities Act", available at: <https://www.ada.gov/>.
- UK government (2010), "UK's Equality Act of 2010", available at: <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2010/15/contents>.
- Zeng, L. et al. (2019), "HepticRein: design and development of an interactive haptic rein for a guidance robot", *Proceedings of the 16th International Conference Computers Helping People with Special Needs – ICCHP*, pp. 94-101.
- Zeng, L.A. (2015), *Survey: Outdoor Mobility Experiences by the Visually Impaired*, Mensch & Computer – Workshopband.

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

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

Antonella Trombadore<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5098-7187>

Debora Giorgi<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-4640-1702>

Gisella Calcagno<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1035-6890>

Giacomo Pierucci<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-8475-9908>

<sup>1</sup> Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Firenze, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze, Italia

## RICERCA E Sperimentazione/ RESEARCH AND EXPERIMENTATION

[antonella.trombadore@unifi.it](mailto:antonella.trombadore@unifi.it)

[debora.giorgi@unifi.it](mailto:debora.giorgi@unifi.it)

[gisella.calcagno@unifi.it](mailto:gisella.calcagno@unifi.it)

[giacomo.pierucci@unifi.it](mailto: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'involturo, 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 intelligibile 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

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

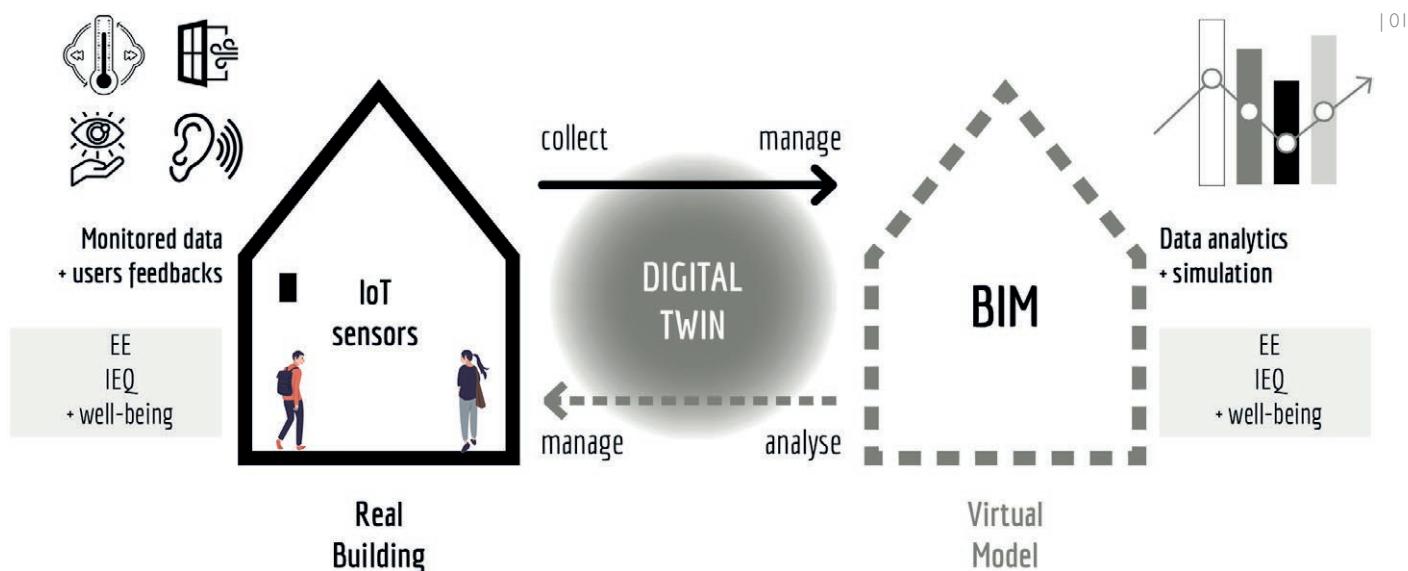
Per rispondere all'imperativo di efficienza energetica degli edifici, le potenzialità del BIM si sono sviluppate principalmente in fase di progettazione (BIM-BEM - *Building Energy Modeling*) per la simulazione del comportamento energetico dell'edificio a scopo diagnostico e predittivo (Farzaneh *et 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

energetica sono legate all'avanzamento dei sistemi di monitoraggio dell'edificio (IoTs), 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-EcoSuRe<sup>1</sup>, 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 project<sup>2</sup>, 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 moni-

toring 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 informatici<sup>2</sup> 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*

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 sistematico, 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'approccio transdisciplinare che ha unito la progettazione dello spazio con il *Service Design* si allinea con pratiche

no. 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 le 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

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 *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'efficien-  
tamento energetico che passa non solo attraverso la tecnologia, ma prevede un più diretto e attivo coinvolgimento dell'*user*. 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 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 influenza in maniera significativa sul consumo energetico (Kallivainen, 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 procede-

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 experts<sup>2</sup> 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-

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 Geetson 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 coinvolgano l'utente a generare soluzioni creative basandosi sui parametri ambientali di comfort termoigrometrico, illuminazione, qualità dell'aria e prestazioni dell'edificio.

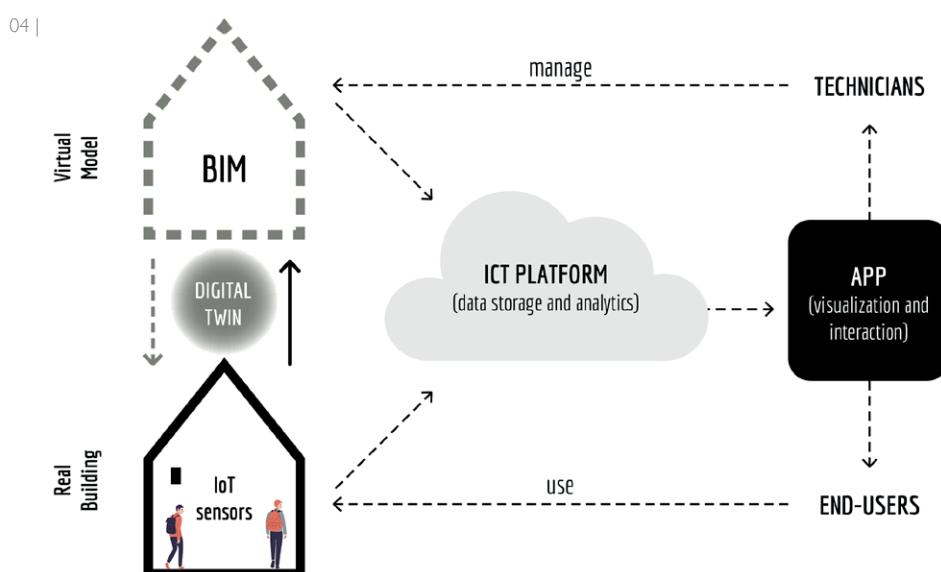
#### Sinergia transdisciplinare e sviluppi futuri

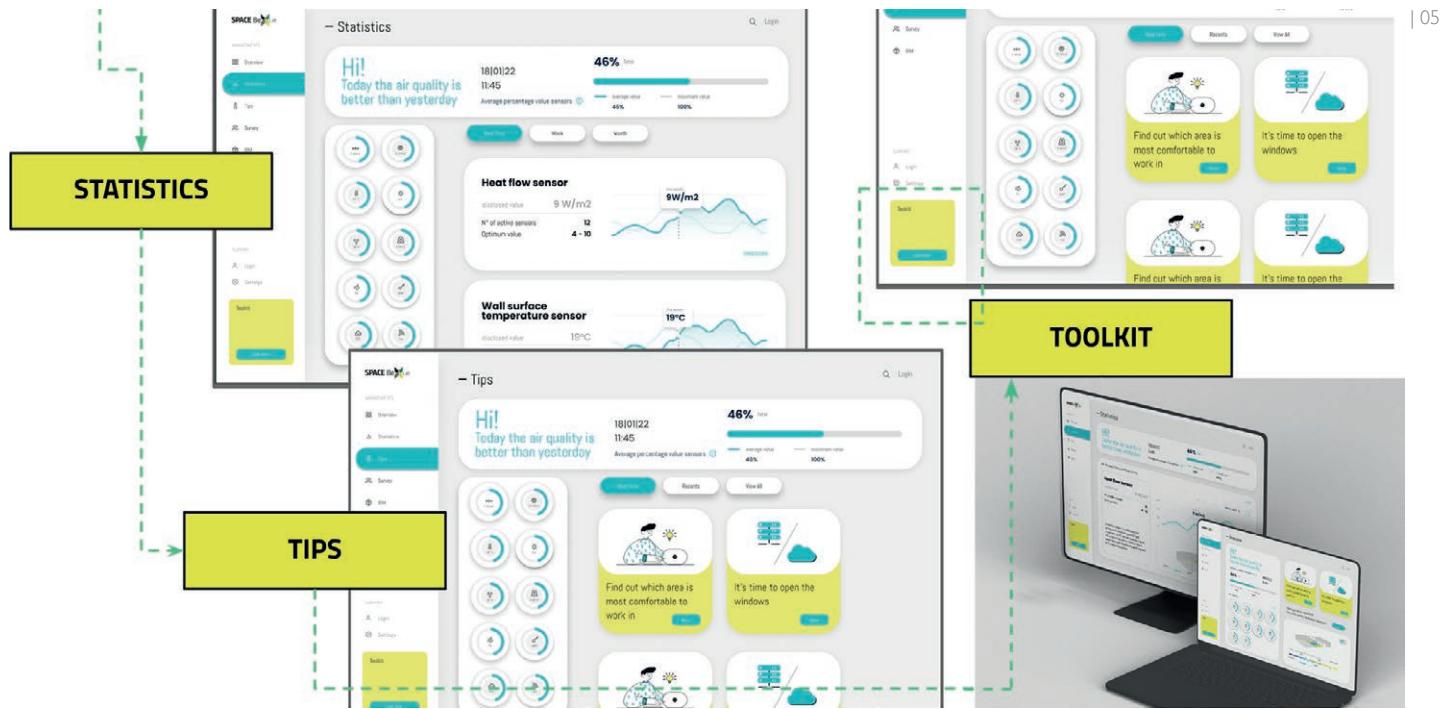
La necessaria transizione ecologica non può prescindere oggi dalle potenzialità offerte dalla transizione digitale, anche nel settore edilizio. Indagando, mettendo a sistema e testando le tecnologie chiave abilitanti (a partire da ICT e IoT) è possibile, infatti, intravedere grandi opportunità per migliorare 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.

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

<sup>1</sup>Il progetto Med-EcoSuRe è finanziato dal programma transfrontaliero ENI CBC MED.

<sup>2</sup>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 Mastrandri, 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*, Vol. 26, pp. 58-83.
- Farzaneh, A., Monfet, D. and Forques, 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.

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, Patrício, 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

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

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

<sup>2</sup>The 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.

Monica Lavagna<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1001-4292>

Serena Giorgi<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-9255-1197>

Daniela Pimpomi<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-8747-7455>

Andrea Porcar<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7550-7805>

<sup>1</sup> Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Italia

<sup>2</sup> AIRI Associazione Italiana per la Ricerca Industriale, Roma, Italia

**Abstract.** Le Tecnologie Abilitanti hanno il potenziale per trasformare da un lato i flussi fisici di materiali e risorse (modalità di produzione e costruzione), dall'altro le relazioni immateriali di tipo organizzativo e gestionale (scambio e monitoraggio di dati e relazioni lungo l'intera catena del valore). Per questo sono da considerare rilevanti nel supportare i processi di cambiamento finalizzati all'uso circolare delle risorse. L'articolo presenta alcune ricerche e sperimentazioni, a livello europeo e italiano, volte allo sviluppo e applicazione di Tecnologie Abilitanti per l'economia circolare e al loro allineamento ai bisogni e sfide della società, attraverso il coinvolgimento diretto di attori dell'ecosistema del settore edilizio in momenti di confronto e di co-creazione per determinare potenziali strategie e azioni operative per l'innovazione del settore.

**Parole chiave:** Tecnologie digitali; Economia circolare; Settore delle costruzioni; Co-creazione; Coinvolgimento stakeholder.

## Introduzione

Il ripensamento del modello economico lineare nella direzione dell'economia circolare, al fine di garantire un uso appropriato delle risorse non solo energetiche ma soprattutto materiali, richiede di innovare i processi di produzione e consumo e le correlate tecnologie, sia di tipo "hard" (fisiche) sia di tipo "soft" (gestionali).

Da un lato occorre superare alcune rigidità tipiche delle attuali tecnologie produttive e costruttive che caratterizzano il settore edilizio (ragionando anche sulle tecnologie per la decostruzione dell'edificio e la rilavorazione dei suoi componenti a fine vita), dall'altro occorre attivare nuovi modelli organizzativi e gestionali (e di business) basati su innovativi strumenti e relazioni tra operatori, correlati all'intero ciclo di vita delle risorse (nella

prospettiva dell'estensione della responsabilità del produttore, del prodotto-servizio, ecc.). Questo significa in particolare favorire il dialogo tra operatori in ambiti differenti (approvvigionamento, produzione, distribuzione, installazione, manutenzione, disassemblaggio, logistica inversa, remanufacturing/riuso, ecc.), la gestione delle informazioni sui flussi materici di risorse lungo l'intera filiera, la sinergia con altre filiere produttive in un'ottica di prossimità di risorse, di integrazione di servizi e di circolarità.

## Individuazione delle Tecnologie Abilitanti per l'economia circolare

Molteplici sono le Tecnologie Abilitanti di supporto a questi percorsi di transizione<sup>1</sup>.

Un primo raggruppamento riguarda le tecnologie "soft" digitali (Chauhan *et al.*, 2022), il cui supporto consiste nel raccogliere e mettere in rete tra operatori le informazioni nel tempo. Il monitoraggio di dette informazioni nell'intero ciclo di vita costituisce un importante tassello conoscitivo a supporto di analisi predittive e progettuali per il riuso, creando dunque una "circolarità" delle informazioni (informazioni su uso/disassemblaggio/fine vita/riuso a supporto di successive attività di progettazione e produzione). Occorrono strumenti di gestione (*data storage, analysis and sharing*) che facilitino la raccolta dei dati lungo il ciclo di vita delle risorse, lo scambio di dati in tempo reale e la disponibilità e fruibilità di dati relativi al monitoraggio dei cicli di vita di prodotti/pro-

## Enabling technologies for circular economy in the construction sector

**Abstract.** Enabling Technologies have the potential to transform both the physical flow of materials and resources (production and construction methods), and the intangible organisational and managerial relationships (exchange and monitoring of data and relationships along the entire chain of value). They should, therefore, be considered important in supporting change processes aimed at the circular use of resources. This paper presents some research and experiments, at European and Italian level, aimed at developing and applying Enabling Technologies for circular economy, and at aligning them with the needs and challenges of society, by directly involving actors of the building sector ecosystem in moments of discussion and co-creation to define potential strategies and operational actions for innovation in the sector.

**Keywords:** Digital technologies; Circular economy; Construction sector; Co-creation; Stakeholder engagement.

## Introduction

Rethinking the linear economic model in terms of circular economy, to guarantee an appropriate use of resources, such as energy and above all materials, requires innovating the production and consumption processes and the related technologies, both of the "hard" type (physical) and of the "soft" type (management).

On the one hand, some rigidities typical of current production and construction technologies that characterise the building sector (for example in the case of technologies for the deconstruction of the building and the reworking of its components at the end of the building's life) should be overcome; on the other new organisational and managerial (and business) models based on innovative tools and relationships between operators, related to the entire life cycle of resources (in terms

of the extent of the producer's responsibility, of the product-service, etc.), should be activated. This means fostering the dialogue between operators in different fields (procurement, production, distribution, installation, maintenance, disassembly, reverse logistics, remanufacturing/reuse, etc.), improving the management of information on the material flows of resources along the entire supply chain, and the synergy with other production chains with a view to proximity of resources, integration of services and circularity.

## Identifying Enabling Technologies for circular economy

There are many Enabling Technologies to support these transition paths<sup>1</sup>.

A first grouping concerns "soft" digital technologies (Chauhan *et al.*, 2022), whose support consists in collecting and networking information over time

cessi/risorse, interoperabili con strumenti di elaborazione dei dati, ossia di modellazione, valutazione e supporto alle decisioni (Giorgi *et al.*, 2022a).

Il BIM (*Building Information Modeling*) è in grado di mettere in relazione molteplici aspetti progettuali e gestionali dell'edificio lungo il suo ciclo di vita, attraverso la rete multi-stakeholder (Charef *et al.*, 2021; Eadie *et al.*, 2013), ma va integrato con altri strumenti.

*Internet of Things* consente di raccogliere, immagazzinare, connettere ed elaborare una notevole quantità di dati, che possono fornire informazioni utili per: l'ottimizzazione dei processi; la gestione del patrimonio costruito (*facility management*, politiche e pianificazione istituzionale, ecc.); la tracciabilità e il monitoraggio in tempo reale, favorendo le valutazioni del ciclo di vita, la manutenzione predittiva e la gestione del fine vita (e del riuso).

*Digital twin* di prodotti-edifici-quartieri-città (mappatura dell'esistente) consente oltre che una raccolta ordinata delle informazioni, la possibilità di modellizzare scenari, supportando la progettazione e i processi di manutenzione e riuso (per esempio, modellizzare una porta e il suo utilizzo, per definire diverse opzioni di *remanufacturing* a fine vita e condividere i risultati su piattaforma web per personalizzare in base alle richieste dei possibili acquirenti, ottimizzando le rilavorazioni per il riuso). I *Big Data* possono consentire la raccolta di informazioni (es. satellitari, sul comportamento degli utenti durante l'uso), e favorire la personalizzazione, la manutenzione predittiva, la previsione dei cicli di durata e sostituzione. Tali informazioni possono aiutare la progettazione e allungare la vita del prodotto.

*Artificial Intelligence (IA) e Machine Learning* possono suppor-

tare le scelte di progetto verso l'ottimizzazione delle risorse, sostituendo modelli deterministici basati sulla simulazione (che richiedono la completezza dei dati di input) con modelli di previsione basati su pochi input. Inoltre, l'IA viene utilizzata per il tracciamento dei materiali e per una migliore separazione dei rifiuti grazie al riconoscimento per immagini.

*Blockchain* supporta la tracciabilità, la trasparenza e la condivisione delle informazioni, e la semplificazione dei processi di certificazione.

Piattaforme online (*digital web-based platform*) possono favorire il networking tra operatori della filiera e l'interscambio sia di informazioni sia di materiali-prodotti a fine vita (cfr. paragrafo seguente) o di scarti produttivi da un'industria a un'altra.

Etichette intelligenti (*smart tags*) attive e passive, basate su RFID, sensori e codici a barre da applicare ai prodotti consentono la tracciabilità delle informazioni nel tempo, ma anche il monitoraggio durante l'uso o la logistica.

Un secondo raggruppamento riguarda le Tecnologie Abilitanti “hard”, che riguardano sia i processi di produzione, sia i processi di costruzione/disassemblaggio, sia i processi di rilavorazione a fine vita (riuso). L'ottimizzazione dei flussi materici (es. riuso e circolarità delle risorse) può essere ottenuta da modifiche nei modelli di gestione (es. prodotti-servizio) supportati da tecnologie soft, ma deve essere accompagnata da una migliore e più efficiente capacità di compiere le operazioni fisiche di produzione, di rilavorazione dei componenti, di assemblaggio e disassemblaggio, ecc.

*Automated Systems and Robotics* sono un importante supporto per la prefabbricazione off-site, volta all'uso ottimizzato delle risorse, alla riduzione degli sfridi (tipici del cantiere artigianale).

between operators. The monitoring of said information throughout the life cycle constitutes an important cognitive element in support of predictive and planning analyses for reuse, thus creating a “circularity” of information (information on use/disassembly/end of life/reuse, in support of subsequent design and manufacturing activities). There is a need for management tools (data storage, analysis and sharing) that facilitate the collection of data along the life cycle of resources, the exchange of data in real time, and the availability and usability of data relating to the monitoring of the life cycles of products/processes/resources, interoperable with data processing tools, i.e. modelling, evaluation and support for decision-making (Giorgi *et al.*, 2022a). BIM (*Building Information Modelling*) is able to relate multiple design and management aspects of the building

throughout its life cycle, through the multi-stakeholder network (Charef *et al.*, 2021; Eadie *et al.*, 2013), but it must be integrated with other tools. The *Internet of Things* makes it possible to collect, store, connect and process a considerable amount of data, which can provide useful information for: process optimisation; management of the building stock (*facility management*, policies and institutional planning, etc.); traceability and real-time monitoring, facilitating life cycle assessments, predictive maintenance and end of life (and reuse) management. A *digital twin* of products-buildings-districts-cities (mapping of the existing) allows not only an orderly collection of information, but also the possibility of modelling scenarios, supporting the design as well as maintenance and reuse processes (for example, modelling a door and its use,

to define various end of life remanufacturing options and to share the results on a Web platform for customisation according to the requests of potential buyers, optimising rework for reuse).

*Big Data* allows the collection of information (e.g. satellite, on user behaviour during use), and favours customisation, predictive maintenance, prediction of life and replacement cycles. Such information can support design and extend product life.

*Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning* can support project choices towards resource optimisation, replacing deterministic models based on simulation (which require exhaustive input data) with forecasting models based on few inputs. Furthermore, AI is being used for material tracking and for better waste separation thanks to image recognition.

*Blockchain* supports traceability, transparency and sharing of information, and simplification of certification processes.

Online platforms (*digital Web-based platforms*) can facilitate networking between operators in the supply chain and the exchange of both information and end of life materials-products (see next paragraph) or production waste from one industry to another.

Active and passive *smart tags*, based on RFID, sensors and barcodes to be applied to products, allow the traceability of information over time, but also monitoring during use or logistics.

A second grouping is made up of “hard” Enabling Technologies, which concern both production processes, construction/disassembly processes, and end of life reworking processes (reuse). The optimisation of material flows (e.g. reuse and circularity of re-

le), alla modularità e reversibilità costruttiva per favorire l'adattabilità e la manutenibilità. Nel riuso/*remanufacturing* potrebbero supportare lavorazioni personalizzate di piccoli lotti e di prodotti altamente differenziati.

*Additive Manufacturing* o con stampa 3D consente un uso efficiente delle risorse e un maggiore controllo/libertà delle geometrie (e quindi alta personalizzazione) in base agli input dei modelli digitali, favorendo anche la creazione di componenti mancanti per rigenerare/riparare un prodotto o elemento costruttivo.

I processi di gestione “automatizzata” possono confluire con una gestione “artigianale” di flussi poco omogenei tipici del riuso e del *remanufacturing* in ambito edilizio, che non permettono di “industrializzare” i processi di rilavorazione. Si tratta di indagare le potenzialità di “flessibilità” che le Tecnologie Abilitanti hard riescono ad avere (es. macchine adattive e integrazione IT/OT).

Occorrerebbe inoltre esplorare applicazioni nell'ambito del cantiere, non solo in fase di montaggio. Per esempio, l'uso di robot per la demolizione selettiva potrebbe far fronte a una delle maggiori criticità della decostruzione, ossia l'alto costo della manodopera per lo smontaggio degli elementi costruttivi (e anche assicurare la massima precisione e i minimi danni sugli elementi smontati).

### Applicazioni pilota europee

Il progetto “Building As Material Bank”<sup>3</sup> (BAMB) è stato pioniere nella sperimentazione dei “Materials Passport” (MP), ovvero

A livello europeo, esistono alcune esperienze pilota<sup>2</sup> riguardo tecnologie abilitanti “hard” e “soft”.

sources) can be obtained by changes in management models (e.g. products-services) supported by soft technologies, but must be accompanied by a better and more efficient ability to carry out physical operations of production, rework of components, assembly and disassembly, etc.

Automated systems and robotics are an important support for off-site prefabrication aimed at optimising the use of resources, reducing waste (typical of the artisan site work), modularity and constructive reversibility to favour adaptability and maintainability. In reuse/remanufacturing they could support customised processing of small batches and highly differentiated products.

Additive manufacturing or 3D printing allows an efficient use of resources and greater control/freedom of geometries (and, therefore, high customisation)

based on digital model inputs, also favouring the creation of missing components to regenerate/repair a product or constructive element.

The “automated” management processes can conflict with the “artisanal” management of not very homogeneous flows typical of reuse and remanufacturing in the building sector, which do not allow the reworking processes to be “industrialised”. The potential for “flexibility” that hard Enabling Technologies could have (e.g. adaptive machines and IT/OT integration) should be investigated.

It would also be necessary to explore applications within the construction site, not just during the assembly phase. For example, the use of robots for selective demolition could address one of the major challenges of deconstruction, i.e. the high cost of labour for the disassembly of the building

strumenti digitali, interoperabili con *software BIM*, in grado di raccogliere l'insieme di dati che descrivono le caratteristiche dei materiali e dei componenti facenti parte di prodotti ed edifici (EPEA, 2017). In particolare, secondo quanto proposto da BAMB, i produttori dovrebbero alimentare una piattaforma condivisa e accessibile (*Material Passport Platform*) per mettere a disposizione di progettisti, gestori del patrimonio edilizio e utenti finali, tutte le informazioni utili per la gestione dei materiali stoccati nell'edificio. Il MP deve contenere:

- informazioni per identificare i prodotti stoccati nell'edificio (es. produttore, marca di prodotto);
- raccolta delle schede tecniche, EPD (*Environmental Product Declaration*) e MSDS (*Material Safety Data Sheet*) dei prodotti;
- informazioni su uso e manutenzione dei prodotti installati nell'edificio e le istruzioni su come assemblarli e disassemblarli;
- indicazioni sul fine vita dei prodotti o ulteriori cicli di vita, ad esempio potenziale riutilizzabilità, rilavorabilità o riciclabilità.

Anche se l'applicazione dei MP nel settore edilizio è ancora scarsa e in fase iniziale (Munaro and Tavares, 2021) l'innovazione apportata da BAMB è stata colta dalla Fondazione Madaster che ha sviluppato una piattaforma, interattiva con file sorgente BIM, per l'archiviazione e lo scambio di dati relativi a materiali, componenti e prodotti stoccati negli edifici (Rau and Oberhuber, 2019). Gli utenti primari sono i progettisti, i proprietari degli edifici e i *facility manager* che attraverso la piattaforma possono generare passaporti di edificio (simili a report informativi).

elements (and also ensure maximum precision and minimum damage on the disassembled elements).

### European pilot applications

At European level some pilot experiences<sup>2</sup> have concretely dealt with “hard” and “soft” Enabling Technologies.

The project “Buildings As Material Banks” (BAMB)<sup>3</sup> was a pioneer in the experimentation of “Material Passports” (MP), i.e. digital tools, interoperable with BIM software, capable of collecting data about characteristics of materials and components that constitute products and buildings (EPEA, 2017). In particular, as suggested by BAMB, manufacturers should provide useful information for the management of materials stored in the building to a shared and accessible platform (*Material Passport Platform*) available

to designers, building managers and end users. The MP must contain:

- information to identify products stored in the building (e.g. manufacturer, product brand, etc.);
- collection of product technical data sheets, EPD (*Environmental Product Declaration*) and MSDS (*Material Safety Data Sheet*);
- information about the use and maintenance of products installed in the building and instructions for assembling and disassembling them;
- indications about the end of life of products and further life cycles, for example potential reuse, remanufacturing or recycling.

Even if the application of MPs in the building sector is still scarce and in an early stage (Munaro and Tavares, 2021), the innovation introduced by BAMB was taken up by the Madaster

Partendo dalle informazioni sull'edificio e sui prodotti, archiviate in gemelli digitali all'interno di file BIM, la piattaforma elabora tali file BIM e li arricchisce con dati provenienti da database interni alla piattaforma stessa, basati su fonti sia proprie-  
tarie sia pubbliche. L'accuracy e l'affidabilità dei dati Madaster si basano sulla completezza delle informazioni contenute nel file di origine BIM (*digital twin*), provenienti da tutti gli operatori coinvolti lungo il processo edilizio. La piattaforma restituisce, poi, diverse informazioni relative alla scala dell'edificio e alla scala del prodotto. Tali informazioni costituiscono una fonte affidabile di dati per sviluppatori, finanziatori e progettisti, utile ad allungare la vita utile degli edifici e ad alimentare nuovi mercati basati sulla circolarità dei materiali. La piattaforma Madaster assicura la riservatezza e la disponibilità dei dati e gestisce l'accessibilità di terze parti.

Oltre alle informazioni sui prodotti e sulle relative quantità stoccate nell'edificio, Madaster mostra anche il valore economico netto di ciascun materiale, attingendo le informazioni da database interni alla piattaforma, alimentati da differenti fonti come "Federal Reserve Economic data", "London Metal Exchange", ecc. Esiste la volontà di includere anche il profilo ambientale dei prodotti, ma la collezione dei dataset ambientali risulta ancora incompleta. La valutazione economica fornisce una previsione dei costi di demolizione e di trasporto di ciascun materiale a fine vita: il confronto tra costo di fine vita e valore economico netto definisce il valore residuo dei materiali e il vantaggio (o svantaggio) economico del potenziale riutilizzo dello stesso (Fig. 1). Esempi concreti di edifici dotati di MP sono i progetti dello studio di architettura RAU Architects, come Alliander Headquarters, tra i primi edifici censiti nella piattaforma, e la nuova sede

Foundation, which developed a platform, interactive with BIM source files, for archiving and exchanging data relating to materials, components and products stored in buildings (Rau and Oberhuber, 2019). The primary users are designers, building owners and facility managers who, through the platform, can generate building passports (similar to information reports). Starting from information about the building and products, stored in digital twins as BIM files, the platform processes these BIM files and adds data from internal databases, based on both proprietary and public sources. The accuracy and reliability of Madaster data are based on the completeness of information contained in the BIM source file (*digital twin*) and coming from all operators involved along the building process. Finally, the platform returns miscellaneous information re-

lating to the building scale and product scale. This information is a reliable source of data for developers, investors and designers. It is useful to extend the service life of buildings and to activate new markets based on material circularity. The Madaster platform ensures confidentiality and availability of data, and manages third party access. In addition to product-related information and related quantities stored in the building, Madaster shows the net economic value of each material, drawing information from internal databases of the platform, based on different sources, such as "Federal Reserve Economic data", "London Metal Exchange", etc. There is also a willingness to include the environmental profile of the products, but the collection of environmental datasets is still incomplete. The economic evaluation provides a forecast of the demolition

di Triodos Bank, recente esempio per il quale la generazione dei MP in Madaster è stata eseguita in maniera il più possibile accurata attraverso una collaborazione integrata tra tutte le parti nel processo di sviluppo e costruzione.

Strumenti come i MP sono stati pensati anche per abilitare a catena altre tecnologie: le informazioni registrate in BIM se aggiunte ai dati GIS (*Geographic Information System*) possono alimentare il CIM (*City Information Modeling*) che consente di inventariare, visualizzare, analizzare, monitorare e gestire le risorse stoccate all'interno dell'ambiente costruito.

Tali informazioni, inoltre, permettono di sviluppare in modo più preciso ed efficace *digital web-based platform* per lo scambio di materiali, abilitando il riuso e l'estensione della vita utile dei prodotti, dando la possibilità a progettisti e utilizzatori finali di scegliere prodotti presenti sul mercato secondario. In particolare, nel nord Europa, si trovano esempi di piattaforme di scambio materiali che stanno diventando spazi di mercato virtuale che mettono in circolo prodotti secondari. Esempi sono le piattaforme "Salvo", che interessa la zona territoriale di UK e Irlanda, "Opalis", che ricopre il territorio di Belgio, Paesi Bassi e Lussemburgo, e "Bellastock" in Francia. Queste piattaforme tracciano e georeferenziano i materiali secondari disponibili, mettendo in comunicazione diversi operatori, attivando dinamiche di *remanufacturing* e recupero che estendono la vita utile delle risorse materiali già consumate nel settore edilizio. Indagini statistiche del settore del riuso condotte nell'area nord europea dal progetto Interreg NWE 739<sup>4</sup>, ha mostrato che tali mercati "digitali" coprono attualmente un volume economico di oltre 500 milioni di euro di fatturato relativo alle vendite di materiali di recupero, contano circa 7.000 dipendenti a tempo pieno e 615.000 tonnellate di materiali stoccati.

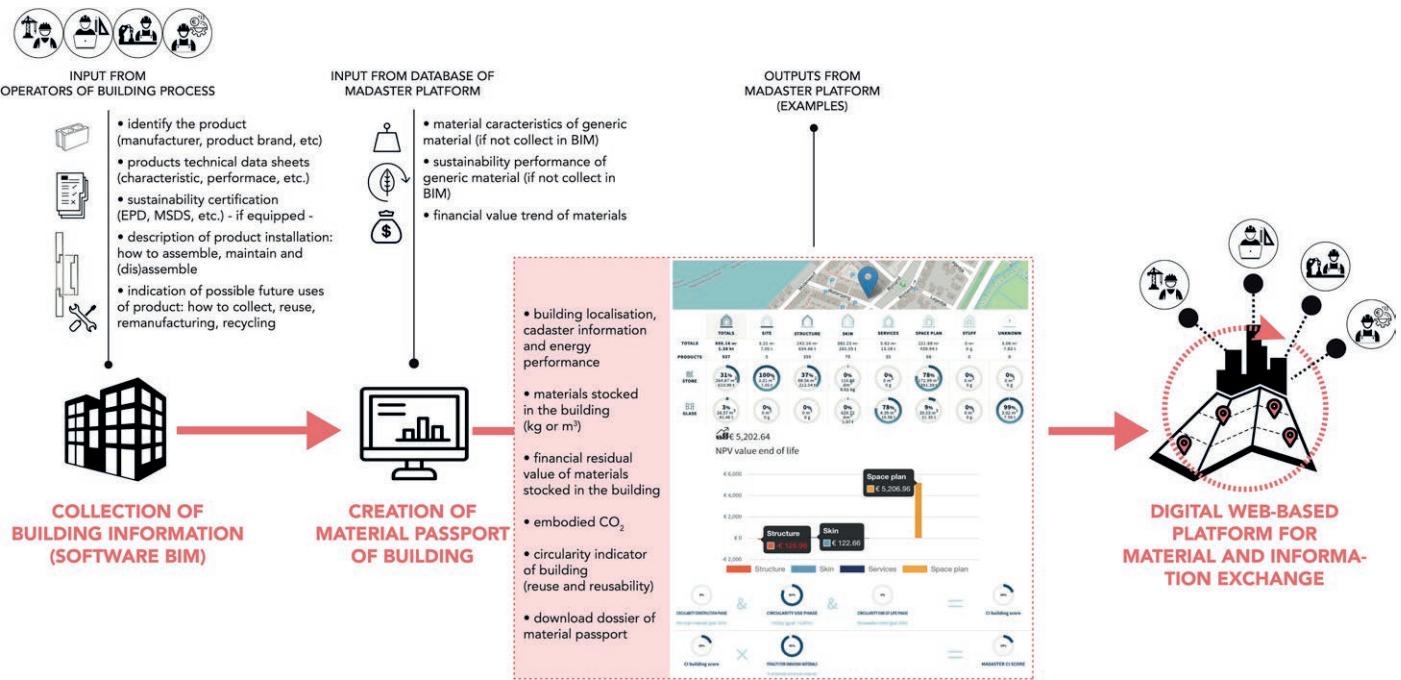
and transport costs of each material at the end of its life: the comparison between the end of life cost and the net economic value defines the residual value of materials and the economic advantage (or disadvantage) of its potential reuse (Fig. 1).

Example cases of buildings equipped with MP are given by projects designed by RAU Architects, such as the Alliander Headquarters, which is among the first buildings surveyed in the platform, and the new headquarters of Triodos Bank. For this last more recent example, the generation of MPs in Madaster was performed as accurately as possible through an integrated collaboration between all operators in the development and construction process.

Tools such as MPs have also been designed to enable other technologies: the information recorded in BIM, if added to GIS (*Geographic Informa-*

*tion System*), can provide CIM (*City Information Modelling*), which allows to inventory, view, analyse, monitor and manage the resources stored within the built environment.

Furthermore, this information enables the development of a more precise and effective digital Web-based platform for materials exchange, enhancing the reuse and extension of the product's service life, empowering designers and end users to choose products present on the secondary market. In particular, in northern Europe, material exchange platforms are becoming virtual market spaces that make secondary products available. Examples are the platforms "Salvo", which covers the territorial area of the UK and Ireland, "Opalis", which covers the territory of Belgium, The Netherlands and Luxembourg, and "Bellastock" in France. These platforms track and georeference the sec-



Nell'ambito delle tecnologie “hard”, la ricerca BAMB e il Laboratory for Green Transformable Buildings hanno sperimentato progetti pilota per testare tecnologie reversibili e tecniche di costruzione off-site. Tra i primi, il Circular Retrofit Lab<sup>5</sup> ha riguardato la riqualificazione di un edificio degli anni '70 adibito ad alloggio per studenti a Bruxelles. Particolare attenzione è stata data alla fase di progettazione e alle scelte delle connes-

sioni connotate dalla facilità e rapidità di assemblaggio e disassemblaggio. La sperimentazione ha riguardato soluzioni di pareti perimetrali e partizioni interne in grado di aumentare l'adattabilità dell'edificio per un riuso nel tempo. L'involucro è stato costruito completamente off-site e agganciato alla struttura portante esistente attraverso un assemblaggio a secco. Le partizioni interne sono state co-create tra progettisti e produt-

ondary materials available, connecting different operators, activating remanufacturing and recovery dynamics that extend the service life of the material resources already used in the construction sector. Statistical surveys of the reuse sector, conducted in the northern European area by project Interreg NWE 739<sup>4</sup>, showed that these “digital markets” currently cover an economic volume of over 500 million euros in turnover relating to the sales of recycled materials, numbering around 7,000 full-time employees and 615,000 tons of stored materials.

In the field of “hard” technologies, BAMB research and the Laboratory for Green Transformable Buildings have experimented pilot projects to test reversible technologies and off-site construction techniques. Among the first projects, the Circular Retrofit Lab<sup>5</sup> involved the redevelopment of

a 1970s building used as student accommodation in Brussels. This pilot project pays particular attention to the design phase and to the choices of the connections characterised by easy and rapid assembly and disassembly solutions. The experimentation concerned solutions for envelope walls and internal partitions capable of increasing the adaptability of the building for reuse over time. The envelope was built completely off-site and anchored to the existing load-bearing structure through dry connections. The internal partitions were co-created between designers and manufacturers to envision, plan and apply constructive solutions that enable easy disassembly and reuse.

#### The SocKETs project and the Italian context

The European project SocKETs<sup>6</sup> (Societal Engagement with Key Enabling

Technologies) focused on Enabling Technologies and developed six different participatory processes in six countries (Bulgaria, Estonia, Italy, The Netherlands, Serbia, and Spain). The ultimate objective of these societal engagement processes has been to test “co-creation” methodologies as an instrument to align technological development to societal values and needs. The Italian participatory process (SocKETs Lab) mainly focused on Technologies enabling the transition of the building and construction sector towards circular economy.

The starting point was the identification of the innovation ecosystem related to the specific sector. This was carried out with a desk analysis and by conducting interviews involving different kinds of experts, leading to a mapping of technologies, application scenarios, actors, roles and relations,

drivers, challenges, and barriers. The Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and distributed ledger technologies (e.g. Blockchain) were identified as the main “soft” technologies, while robotics and advanced manufacturing systems, some satellite technologies, drones, and advanced materials were the main “hard” ones. Table 1 shows the innovation areas where these technologies can be applied, and lists the drivers and the challenges they can contribute to, in compliance with the circular economy principles. Many identified applications are related to the digitalisation of processes or products/services, with the final goal of reaching an efficient use of energy and other resources (primarily materials, but also space within the built environment).

Three kinds of stakeholders, playing heterogeneous roles and having differ-

tori per prevedere, programmare e applicare soluzioni costruttive che abilitino il facile disassemblaggio e riuso.

## Il progetto SocKETs e lo scenario italiano

Le Tecnologie Abilitanti sono state oggetto di studio del progetto europeo SocKETs<sup>6</sup> (Societal Engagement with Key Enabling Technologies), che ha realizzato 6 percorsi partecipativi in altrettanti paesi (Bulgaria, Estonia, Italia, Olanda, Serbia e Spagna) con l'obiettivo di testare le metodologie della "co-creation" nell'allineare lo sviluppo tecnologico ai valori e alle sfide della società. In particolare, il percorso partecipativo (SocKETs Lab) realizzato in Italia si è focalizzato sulle tecnologie per la transizione verso l'economia circolare del settore edilizio e delle costruzioni.

La prima fase è stata l'individuazione dell'ecosistema dell'innovazione relativo a questo ambito, mediante uno studio della letteratura e del mercato e la realizzazione di interviste a diverse tipologie di esperti del settore, al fine di mappare tecnologie e scenari applicativi, attori, ruoli e relazioni, drivers, sfide e barriere.

Le principali tecnologie individuate sono l'*Internet of Things* (IoT), l'Intelligenza Artificiale (AI) e le tecnologie basate su registri distribuiti (es. *Blockchain*), tra quelle "soft", la robotica e i sistemi di manifattura avanzata, alcune tecnologie satellitari, i droni e i materiali avanzati, tra quelle "hard". La Tabella 1 mostra in quali aree di innovazione possano essere impiegate queste tecnologie e i relativi *drivers* o le sfide a cui possono contribuire a dare una risposta, nel rispetto dei principi dell'economia circolare. Una larga parte delle applicazioni riguarda la digitalizzazione di processi e prodotti o servizi con l'obiettivo di

realizzare un uso più efficiente dell'energia o di altre risorse (in primo luogo materiali, ma anche spazi nell'ambiente costruito). Intorno a questi scenari applicativi, sono state individuate tre tipologie di attori che, con ruoli e relazioni differenti, animano l'ecosistema delle innovazioni sopra citate. Tra gli attori "primari" si possono includere i centri di ricerca e le università, le organizzazioni che si occupano di trasferimento tecnologico, le imprese direttamente coinvolte nello sviluppo e produzione delle tecnologie in questione: quelle edili, ma anche quelle del mondo della chimica e dei materiali, dei componenti o dei settori digitali coinvolti, i professionisti e le associazioni che li raggruppano (come ingegneri o architetti e designers, ma anche i professionisti del digitale), e le *utilities* che gestiscono servizi direttamente collegati alla realizzazione e funzionamento degli edifici. Tutti questi attori sono direttamente coinvolti nello sviluppo delle nuove tecnologie per il settore.

Tra gli attori "secondari" vi sono invece tutti quelli che non sono strettamente coinvolti nello sviluppo delle nuove tecnologie, ma sono interessati in modo diretto dal loro utilizzo. Tra questi ci sono i proprietari e gli utilizzatori (residenti, lavoratori, etc.) degli edifici o le associazioni/enti che si occupano della loro gestione, le associazioni di categoria, gli investitori, le autorità e le istituzioni di livello locale, nazionale ed europeo, organismi di standardizzazione e certificazione.

Infine, ci sono gli attori che possono essere interessati dallo sviluppo del settore in modo indiretto o che sono in grado di determinarne le sorti perché generano il contesto economico e sociale in cui esso avviene. Tra questi attori "di contesto" si possono includere enti pubblici, associazioni di cittadini o di consumatori, compagnie assicurative, mass media, rappresentanti dei lavorato-

ent connections within the innovation ecosystem, have been identified by using the application scenarios as a starting point. *Primary stakeholders* include research centres, academia, organisations dealing with technology transfer, companies directly involved in the development or production of the cited technologies. Examples of these companies span from building and construction, chemicals, materials, to electronic and digital sectors. This first group also includes professionals, both as individuals and organised in associations representing their stakes, such as engineers, architects, designers, as well as professionals providing digital services. Utilities companies are an additional example, as they provide services directly connected to building construction and management. All these primary stakeholders are directly involved in developing new technolo-

gies for the building and construction sector.

*Secondary stakeholders* have a strong interest in using Enabling Technologies within the building and construction sector, but they are not directly involved in their development process. Secondary stakeholders may include building owners and end users (e.g. people working or living inside a building), associations or public authorities dealing with management of the building, trade associations, investors, local, national or European authorities, certification or standardisation bodies.

The last group comprises the *contextual stakeholders* who are indirectly connected to the building and construction sector's development or those who can influence the sector's dynamics since they contribute to shape its economic and societal context. Con-

textual stakeholders may include public authorities, citizens or consumer organisations, insurance companies, trade unions and the media. Some of the players underscored the role of future generations within this category, as on the one hand they cannot influence current decisions, and on the other they represent the most relevant stakeholders when looking at long-term societal challenges (e.g. resource availability, climate change, inclusion and social justice) of the sector.

### Stakeholder engagement and co-creation experiences

The SocKETs participatory process started by involving the ecosystem's primary stakeholders with the aim of defining possible application scenarios for the identified technologies. Two distinct scenarios emerged for innovation towards circularity: one related to

the whole value chain (Fig. 2) and one related to the built environment, with specific focus on cities and neighbourhoods (Fig. 3).

Stakeholders turned out to be open to discussion and highlighted a strong need to share and collaborate inside the building and construction sector, to overcome barriers to innovation and to succeed in the transition towards circularity. Primary actors were so motivated to find common strategies to overcome the challenges that they actively contributed to widen the participation by involving other primary and secondary actors, in a cascade.

The definition of a shared strategy for growth, innovation, and sustainability was recognised as a primary goal by all the stakeholders. The two scenarios were acknowledged as a valid starting point to create a national strategy to

ri. In quest'ultima categoria alcuni degli attori hanno sottolineato il ruolo delle future generazioni, che non possono incidere direttamente sulle dinamiche attuali, ma diventano i portatori d'interesse principali se si guarda allo sviluppo del settore come una leva per agire su sfide sociali di lungo periodo (come la disponibilità di risorse, i cambiamenti climatici, l'inclusione e la giustizia sociale).

#### Esperienze di coinvolgimento degli operatori e co-creazione

Il percorso partecipativo di SocKETs ha coinvolto in prima battuta gli attori primari dell'ecosistema, per delineare ipotesi di scenari applicativi delle tecnologie individuate. Ne sono emersi due scenari per l'innovazione verso la circolarità, riferiti a tutta la catena del valore (Fig. 2) e all'ambiente costruito, con particolare focus sui quartieri e le città (Fig. 3).

Gli stakeholder hanno manifestato disponibilità al confronto e un forte bisogno di condivisione e collaborazione all'interno del settore per superare le barriere all'innovazione e per garantire un successo diffuso alla transizione verso una maggiore circolarità. Gli attori primari del settore sono così motivati nella ricerca di strategie comuni per superare queste sfide che hanno contribuito attivamente ad ampliare la partecipazione, coinvolgendo loro stessi, a cascata, altri attori primari e secondari. L'obiettivo di creare una strategia condivisa per la crescita, l'innovazione e la sostenibilità è stato trasversalmente riconosciuto come prioritario e i due scenari sviluppati sono stati ritenuti un valido punto di partenza per la creazione di una strategia nazionale per l'innovazione del settore. Nello scenario dedicato alla catena del valore, emerge la necessità primaria di ridurre il consumo di risorse. Da qui l'importanza data alle tecnologie che possano consentire la riduzione degli sprechi in fase di fabbricazione (es. tramite industrializzazione e automazione dei processi produttivi), la durabilità (es. grazie a materiali avanzati e uso dei *digital twin* per gestione e manutenzione) oppure il riuso dei componenti e il riciclo dei materiali. In questo percorso le tecnologie soft diventano il fattore abilitante di tutti i processi, garantendo una forte integrazione e ottimizzazione e la capacità di fornire supporto alle decisioni, sempre più sulla base dell'analisi dei dati reali e delle esigenze degli stakeholder.

Nello scenario dedicato all'ambiente costruito, la circolarità si raggiunge mediante l'efficientamento energetico, ma soprattutto mediante modelli di gestione degli spazi che ne consentano la massima efficacia/utilezza durante l'uso. In quest'ottica assumono un ruolo centrale le tecnologie e tecniche costruttive che consentono di avere edifici modulari, assemblabili e disassemblabili, trasformabili o riutilizzabili. In questo contesto, le tecnologie digitali sono abilitanti perché ottimizzano la gestione di ogni spazio che possa essere condiviso tra gli utenti o trasformato per nuovi utilizzi.

#### Leve e barriere all'applicazione delle Tecnologie Abilitanti

Le ricerche presentate restituiscono un articolato quadro di "conoscenze sul campo", grazie al confronto diretto con molti operatori (interviste e workshop con esperti, processi partecipativi), a livello sia europeo sia italiano. Dalle ricerche europee e dal confronto con gli stakeholder sono emerse le potenziali leve e le barriere all'applicazione delle Tecnologie Abilitanti (SocKETs Lab italiano, 2020; Giorgi *et al.*, 2022b).

BUILDING SECTOR DRIVERS/CHALLENGES	INNOVATION AREAS	TECHNOLOGIES
Urban regeneration, land use	Urban planning Shared models Modularity and durability Selective deconstruction	IoT, AI Drones, Satellite technologies, Advanced materials, Advanced manufacturing systems
Reducing materials consumption and waste	Modularity and durability Selective deconstruction Industrial (off-site) production New materials	IoT, Blockchain, AI (also associated to BIM methodologies) Advanced materials (e.g., self-healing materials or advanced recycled materials)
Waste management	Traceability	IoT, AI, blockchain Robotics
Reducing externalities (pollution, CO <sub>2</sub> emissions, ...)	Energy efficiency New materials Industrial production	IoT Advanced materials, advanced manufacturing
Energy efficiency and transition to renewable energy	Smart control Deep optimization New solutions for energy production and storage	IoT, AI Advanced materials
Comfort, quality	Smart control	IoT
Duration, security	Predictive maintenance	IoT, AI

| Tab. 01

innovate the building and construction sector.

The value chain scenario highlights a paramount need to reduce consumption of resources. Hence the crucial role of technologies useful to reduce wastefulness in the manufacturing phase (e.g. industrialisation or automation of manufacturing processes), to increase durability (e.g. advanced materials or digital twins for maintenance and management), or to allow reuse of components and recycling of materials. Soft technologies become enabling for almost all processes in the path towards circular value chains, since they guarantee strong integration, optimisation, and support for decision-making, which increasingly underpins the analysis of actual data and stakeholders' needs.

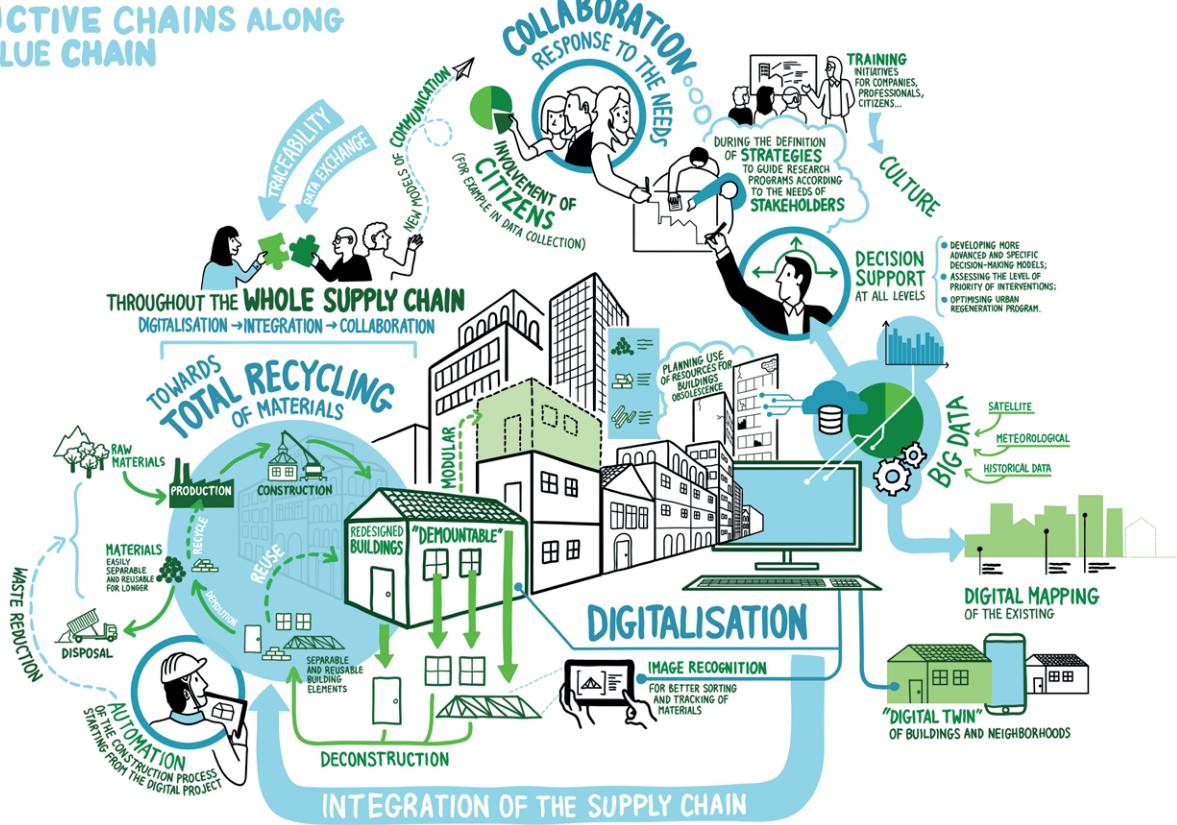
In the built environment scenario, energy efficiency and management

models aimed at maximising efficacy/benefits in the use of spaces are key to achieve circularity. In this case, technologies and construction techniques enabling the development of modular buildings (i.e. buildings - or part of them - that can be assembled, disassembled, transformed or reused) play a central role. Digital technologies are also important since they enable space optimisation, for example when the space needs to be transformed for new uses or when it is shared by different users.

#### Levers and barriers to the application of Enabling Technologies

The research activities described above return an articulated framework of "knowledge on-field", thanks to the discussion with multiple operators (interviews and workshops with experts, participatory processes), at both

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SOLUTIONS FOR PRODUCTIVE CHAINS ALONG THE VALUE CHAIN



ARTWORK BY JACOPO SACQUEGNO 15/12/24

European and Italian levels. Potential levers and barriers to the application of Enabling Technologies emerged from both the analysis and discussions with stakeholders (Italian SocKETs Lab, 2020; Giorgi *et al.*, 2022b).

The potential levers are legislative and economic. The implementation of the minimum environmental criteria in the Green Public Procurement (in addition to the current ones applied in Italy on disassembly and traceability) and the inclusion of rewarding or mandatory criteria in the various regulatory devices is a fundamental lever for all aspects of sustainability, and the related tools (e.g. LCA). Furthermore, the increase in the cost of raw materials (especially those from abroad) and, therefore, in the market itself, leads operators to consider the potential economic benefit of reusing and extending the service life of products through

Enabling Technologies, also linked to new "product-service" solutions. In this direction, the public sphere (and once again the GPP criteria) can be a driving force for the market (since the public client is also the manager of the building stock).

The main barriers identified by the stakeholders concern: the need for new professional figures, new roles and new operators along the building process; the lack of standards and guidelines; the general concern about the commitments that technological change entails in practice; lack of awareness of the benefits offered by new technologies, and a general difficulty in identifying the benefit; the need to increase the skills of the operators involved, through specific training courses; the inability of medium and small enterprises (SMEs), which are widely present in Italy, to manage the

resources (economic, time) necessary to acquire technologies and specialised operators. Industry professionals also highlight the risk of losing recognition of their professionalism in the industrialisation process enabled by some technologies, which would see them absorbed as technicians within the industry, which on average offers lower levels of pay and flexibility than the free profession. Companies, in turn, underline the need to inform and train the population on new technologies and their advantages so that they know how to recognise the added value, both immediate and over time, associated with innovation.

Enabling Technologies are knowledge-intensive and associated with high R&D intensity, rapid innovation cycles, large capital expenditures and highly skilled jobs. This requires the implementation of transversal synergies between the various operators in the supply chain. Some technologies (e.g. digital, additive manufacturing) have a high energy consumption. Their use cannot be purely instrumental and linked to "innovation for the sake of innovation". It is necessary to define ways and methods for their actual use to achieve a positive environmental impact.

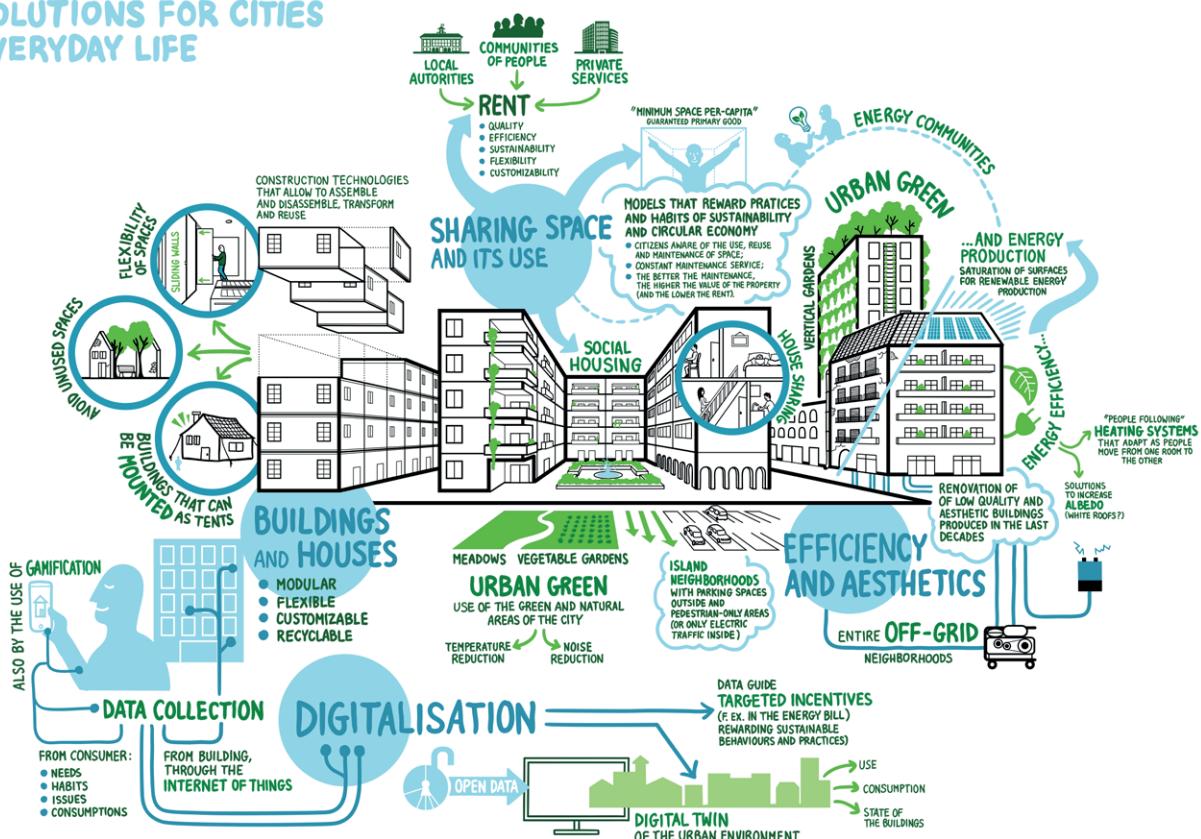
Applying Life Cycle Assessment procedures that highlight the environmental costs (e.g. high energy consumption behind digital technologies) and the benefits in terms of quality and environmental impact that can be obtained from the use of advanced technologies (e.g. saving on materials) is essential for choosing the truly effective technologies in an assessment of the entire life cycle, and also highlight the critical aspects that an excessively intensive use of such technologies could entail.

Le potenziali leve sono di tipo legislativo ed economico. L'implementazione dei criteri CAM nel Green Public Procurement (oltre agli attuali applicati in Italia sulla disassemblabilità e tracciabilità) e l'inserimento nei diversi strumenti normativi di criteri premianti o cogenti è fondamentale leva per tutti gli aspetti di sostenibilità, e i relativi strumenti (es. LCA). Inoltre l'incremento dei costi delle materie prime (soprattutto quelle provenienti dall'estero), quindi il mercato stesso, porta gli operatori a considerare il potenziale beneficio economico del riuso e dell'allungamento della vita utile dei prodotti attraverso le Tecnologie Abilitanti, legata anche a nuove formule di prodotti-servizio. In questa direzione, l'ambito pubblico (e ancora una volta i criteri del GPP) può costituire un traino per il mercato (essendo il committente pubblico anche gestore del patrimonio costruito).

Le principali barriere rilevate dagli stakeholder riguardano: la necessità di nuove figure professionali, nuovi ruoli e nuovi

operatori lungo il processo edilizio; la mancanza di standard e linee guida; la preoccupazione generale per gli impegni che il cambiamento tecnologico comporta nella pratica; la mancanza di consapevolezza sui vantaggi offerti dalle nuove tecnologie e una generale difficoltà nell'individuare il beneficio; la necessità di accrescere le competenze degli operatori coinvolti, attraverso specifici corsi di formazione; l'incapacità delle medie e piccole imprese (PMI), molto diffuse sul territorio nazionale, di sostenere la richiesta di risorse economiche e di tempo necessario per acquisire tecnologie e operatori specializzati. I professionisti del settore evidenziano anche il rischio di perdita del riconoscimento della propria professionalità nel processo di industrializzazione abilitato da alcune tecnologie, che li vedrebbe assorbiti come tecnici all'interno dell'industria, che mediamente offre livelli di retribuzione e flessibilità più bassi rispetto alla libera professione. Le imprese, a loro volta, sottolineano la necessità di informare e formare la popolazione sulle nuove tecnologie e

## 03 | INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND SOLUTIONS FOR CITIES AND EVERYDAY LIFE



i loro vantaggi in modo che sappiano riconoscere il valore aggiunto, immediato e nel tempo, associato all'innovazione.

Le Tecnologie Abilitanti sono ad alta intensità di conoscenza e associate a elevata intensità di ricerca e sviluppo, a cicli di innovazione rapidi, a consistenti spese di investimento e a posti di lavoro altamente qualificati. Questo richiede la messa in campo di sinergie trasversali tra i diversi operatori della filiera. Alcune tecnologie (es. digitale, manifattura additiva) sono ad elevato consumo energetico, per cui, affinché il loro uso non sia puramente strumentale e legato all'"innovazione per l'innovazione", occorre definire le modalità per un loro utilizzo con un effettivo beneficio ambientale.

Applicare procedure di valutazione LCA che evidenzino i costi ambientali (es. elevati consumi energetici dietro le tecnologie digitali) e i benefici in termini di qualità e di impatto ambientale ottenibili dall'uso di tecnologie avanzate (es. risparmio di materiali) risulta essenziale per scegliere le tecnologie realmente efficaci in un bilancio dell'intero ciclo di vita ed evidenziare anche gli aspetti di criticità che un uso eccessivamente intensivo di tali tecnologie potrebbe comportare.

Il bilancio ambientale va svolto in parallelo a quello sociale ed economico, in quanto occorre valutare anche i costi di tali tecnologie e quantificare che i benefici siano altrettanto significativi. Le valutazioni costi-benefici diventano fondamentali per gli operatori coinvolti per avvicinarsi con interesse a tali tecnologie.

Dalle ricerche svolte emerge una realtà, soprattutto in Italia, ancora molto tradizionale, con interesse al tema ma con ancora poca applicazione, se non sperimentale. Per innescare il cambiamento, è stato individuato come basilare il creare momenti

The environmental balance must be carried out in parallel with the social and economic one, as it is also necessary to evaluate the costs of these technologies and to quantify that the benefits are equally significant. Cost-benefit assessments become crucial for the operators involved to approach these technologies with interest.

The research carried out reveals a very traditional context, especially in Italy. There is an interest in the topic but still little practical application, with most of the cases of use of innovative technologies being at an experimental stage. To trigger the change, sharing and networking of operators are essential to activate synergies and start innovation processes. The experiments discussed in the paper helped to create a network of players in the national innovation ecosystem interested and active in the issues of technologies for circularity,

which will take action to promote the identified proposals and strategies at various levels.

#### NOTES

<sup>1</sup> The Enabling Technologies application scenarios derive from literature and from interviews/workshops with stakeholders, and have been integrated by hypotheses of the authors.

<sup>2</sup> The experiences mentioned were the subject of direct interviews and periods of collaboration (Giorgi *et al.*, 2022).

<sup>3</sup> The BAMB project, "Building as Material Banks" (2015-2019) received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, involving fifteen partners from seven different countries, and a dense network of stakeholders.

<sup>4</sup> Interreg NWE 739 Facilitating the Circulation of Reclaimed Building El-

di condivisione e di messa in rete di operatori, utili per attivare sinergie capaci di avviare i processi di innovazione. Le sperimentazioni discusse nell'articolo hanno aiutato a creare una rete di attori dell'ecosistema dell'innovazione nazionali interessata e attiva sui temi delle tecnologie per la circolarità, che si attiverà per promuovere a vari livelli le proposte e strategie identificate.

#### NOTE

<sup>1</sup> Gli scenari di applicazione delle Tecnologie Abilitanti derivano da letteratura e da interviste/workshop con stakeholder e sono stati integrati da ipotesi degli autori.

<sup>2</sup> Le esperienze citate sono state oggetto di interviste dirette e periodi di collaborazione (Giorgi *et al.*, 2022b).

<sup>3</sup> Il progetto BAMB, "Building as Material Banks" (2015-2019) ha ricevuto finanziamenti dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea, ha coinvolto quindici partner provenienti da sette paesi diversi, e una fitta rete di stakeholder.

<sup>4</sup> Interreg NWE 739 Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements (FCRBE), coinvolge le seguenti nazioni: UK, Irlanda, Paesi Bassi, Belgio, Lussemburgo, Francia.

<sup>5</sup> Progetto sviluppato dalla Vrije Universiteit Brussel (VUB) all'interno del Progetto europeo BAMB, realizzato nel 2019.

<sup>6</sup> Il progetto SocKETs, di cui AIRI è partner e a cui partecipano gli autori, ha ricevuto finanziamento dal Programma quadro per la Ricerca e Innovazione Horizon 2020 della Unione Europea, grant agreement nr. 958277.

ements (FCRBE) involves the following countries: UK, Ireland; The Netherlands, Belgium and Luxembourg, France.

<sup>5</sup> Project developed by the Vrije Universiteit Brussel (VUB) within the European BAMB project, implemented in 2019.

<sup>6</sup> The SocKETs project, of which AIRI is a partner and in which the authors participate, has received funding from the European Union's Horizon 2020 Framework Program for Research and Innovation, grant agreement no. 958277

## REFERENCES

Charef R. and Emmitt S. (2021), "Uses of building information modelling for overcoming barriers to a circular economy", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 285, pp. 124854.

Chauhan C., Parida V. and Dhir A. (2022), "Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises", *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 177, 121508.

Eadie R., Browne M., Odeyinka H., McKeown C. and McNiff S. (2013), "BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: an analysis", *Automation in Construction*, 36, 145-151.

EPEA and SundaHus (2017), "Framework for materials passports. BAMB report", available at: <https://www.bamb2020.eu>.

Giorgi S., Lavagna M. (2022a), "Traceability system to support sustainable reuse and re-manufacturing process", in Talamo (ed.), *Re-manufacturing networks for tertiary architectures. Innovative organizational models towards circularity*, FrancoAngeli, Milano, pp. 227-235.

Giorgi S., Lavagna M., Wang K., Osmani M., Liu G. and Campioli A. (2022b), "Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: Stakeholder interviews and analysis of five European countries policies and practices", *Journal of Cleaner Production*, Volume 336.

Munaro M.R. and Tavares S.F. (2021), "Materials passport's review: challenges and opportunities toward a circular economy building sector", *Built Environment Project and Asset Management*, Vol. 11, pp. 767-782.

Rau T. and Oberhuber S. (2016), *Material Matters L'importanza della materia*, Edizioni Ambiente, Milano.

SocKETs Lab italiano (2020). *Mapping of Key Enabling Technologies Innovation Eco-Systems. Circular Economy in the Building and Construction Sector in Italy*, available at: [https://www.airi.it/airi2020/wp-content/uploads/2021/06/SocKETs\\_D1.1\\_Report\\_Airi\\_Final\\_Website.pdf](https://www.airi.it/airi2020/wp-content/uploads/2021/06/SocKETs_D1.1_Report_Airi_Final_Website.pdf)

# Un nuovo strumento di informazione come tecnologia abilitante: applicazione e simulating

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

Francesca Ciampa<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1980-6584>

Caterina Claudia Musarella<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7517-6591>

<sup>1</sup> Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Italia

<sup>2</sup> Dipartimento di Architettura e Territorio, Università degli Studi Mediterranea Di Reggio Calabria, Italia

RICERCA E  
Sperimentazione/  
RESEARCH AND  
EXPERIMENTATION  
Ricerca avanzata (Under 35)

francesca.ciampa@unina.it  
caterina.musarella@unirc.it

**Abstract.** La ricerca mira all'individuazione di uno strumento di informazione per le attività di progettazione attraverso tecnologie abilitanti, sviluppate sulle interazioni tra involucro e contesto. La metodologia, articolata secondo le fasi di analisi, elaborazione e validazione applicativa, prefigura una strategia di risposta ai fenomeni di crisi ambientale ed energetica rispetto alle diverse scale di azione. Considerando l'effetto dei fenomeni climatici sugli involucri e le esigenze prestazionali contemporanee ai quali sono chiamati a rispondere, il contributo restituisce una scheda tecnica dinamica (analisi e valutazione delle prestazioni energetico-ambientali) sulla base del modello redatto dal *European Joint Research Centre*, per verificare l'appropriatezza della progettazione dell'involucro.

**Parole chiave:** Ambiente costruito; *Energy performance impact*; Involucro; Tecnologie abilitanti; *Simulating*.

## Introduzione

L'ambiente costruito, indagato come sistema complesso, evolve nel tempo secondo mutamenti di ordine spaziale investiti da fenomeni che ne impongono la transizione per il mantenimento di un appropriato livello prestazionale (Viola and Gehl, 2019). Da un lato, le criticità legate alle emergenze climatiche (ARUP, 2021) e, dall'altro, le potenzialità di sviluppo definite dal mercato delle *cutting-edge technologies* (Gunal, 2019), impongono un'accelerazione delle capacità di integrazione delle tecnologie attraverso l'innovazione delle strumentazioni cognitive di progetto (Antonini *et al.*, 2020). Considerando l'effetto di tali fenomeni sugli involucri e le esigenze prestazionali contemporanee ai quali sono chiamati a rispondere, l'approccio multiscalar consente di operare sulla dinamicità del carattere sistemico dell'ambiente costruito, determinato dall'interdipendenza relazionale tra il tutto e le parti che lo compongono (Zaffagnini, 1981). Pertanto, la ricerca affronta i temi dell'*energy performance impact*, del *climate technology innovation* e del *built environment impact evaluation* nel quadro dei requisiti richiesti dalla Commissione Europea (COM/2020/950), promuovendo anche un approccio integrato delle politiche comunitarie.

La cooperazione con il Polytechnic Institute de Coimbra, legata agli autori per una ricerca dottorale e per lo svolgimento del Grant E-COST 2022 *European Cooperation in Science and Technology*, ha consentito di approfondire i temi delle vulnerabilità dell'ambiente costruito rispetto alla capacità di adattamento ai cambiamenti climatici in risposta alle nuove strategie di *governance* multiscalar (Ciampa, 2021). Lo scambio scientifico si è focalizzato sul riallineamento prestazionale che gli edifici devono garantire per il raggiungimento di qualità relazionali appropriate al contesto urbano di riferimento. Con particolare attenzione ai processi di decarbonizzazione degli edifici (UE, 2021), la collaborazione scientifica ha consentito la costruzione di uno strumento di informazione, analisi e valutazione delle prestazioni energetico-ambientali sulla base del modello redatto dal *JRC Joint Research Centre* (Murauskaite-Bull and Caramizaru, 2021), per verificare un'adeguata progettazione dell'involucro (Milardi, 2020). Tale modello, in linea con le politiche europee energetiche e sui cambiamenti climatici, supporta le valutazioni d'impatto delle performance dell'involucro edilizio con un sistema tecnologico avanzato con ricadute sia sul processo progettuale che sull'ambiente costruito. Pertanto dalle interazioni tra involucro e contesto, attraverso tecnologie abilitanti, la ricerca restituisce in una logica sistemica uno strumento rappresentato da una "scheda tecnica dinamica".

## A new information tool as an enabling technology: application and simulation

**Abstract.** The research aims at identifying an information tool for design activities through enabling technologies, developed on the interactions between envelope and context. The methodology, articulated according to the phases of analysis, processing, and applicative validation, prefigures a response strategy to the phenomena of environmental and energy crisis with respect to the different scales of action. Considering the effect of climatic phenomena on the envelopes and the contemporary performance requirements they are called to meet, the contribution provides a dynamic data sheet (analysis and evaluation of energy-environmental performance) based on the model drawn up by the European Joint Research Centre, to verify the appropriateness of envelope design.

**Keywords:** Built environment; Energy performance impact; Envelope; Enabling technology; Simulation.

## Introduction

The built environment, investigated as a complex system, evolves over time according to changes in the spatial order affected by phenomena that require its transition to maintain an appropriate level of performance (Viola and Gehl, 2019). On the one hand, the critical issues related to climate emergencies (ARUP, 2021) and, on the other hand, the development potential defined by cutting-edge technologies (Gunal, 2019), impose an acceleration of technology integration capabilities through the innovation of cognitive design tools (Antonini *et al.*, 2020). Considering the effect of these phenomena on the envelopes and the contemporary performance requirements they have to meet, the multi-scalar approach makes it possible to operate on the dynamism of the systemic character of the built environment,

determined by the relational interdependence between the whole and its component parts (Zaffagnini, 1981). Therefore, the research examines the issues of energy performance impact, of climate technology innovation and of built environment impact evaluation in the framework of the requirements of the European Commission (COM/2020/950), also promoting an integrated approach of Community policies.

The cooperation with the Polytechnic Institute de Coimbra, linked to the authors for doctoral research and the Grant E-COST 2022 European Cooperation in Science and Technology, allowed to investigate the vulnerabilities of the built environment in relation to adaptability to climate change in response to new multi-scalar governance strategies (Ciampa, 2021). The scientific exchange focused on the per-

L'accezione di dinamicità attribuita a quest'ultima, si lega alla possibilità di renderla flessibile, e quindi aggiornabile, in base al mutare dei dati, dei parametri e del contesto di riferimento. Tra le principali tecnologie abilitanti, definite da *Boston Consulting* e recepite nel Piano Nazionale "Impresa 4.0" del Ministero dello Sviluppo Economico<sup>1</sup> (MISE, 2020), la ricerca si inserisce all'interno della *Simulation* – simulazione tra macchine intelligenti e interconnesse per aumentare la produttività e l'ottimizzazione dei processi – e della *Horizontal/Vertical Integration* delle informazioni.

La scheda tecnica dinamica, attraverso l'analisi e l'utilizzo dei parametri di conducibilità termica dei materiali e le proprietà di trasmissione di flussi di calore, consente di determinare la quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> durante la fase di utilizzo<sup>2</sup>, quale indicatore principale di sostenibilità ambientale ICE – Indicatori Comuni Europei (UE, 2021). Tale strumento rappresenta un *tool* di supporto alla valutazione delle prestazioni energetiche, verificando gli impatti e le *performance* erogate *ex ante/ex post* progettazione (Pinto, 2019).

### Le tecnologie abilitanti per la decarbonizzazione degli edifici

Le tecnologie abilitanti per la decarbonizzazione degli edifici, nonché di qualità ambientale degli edifici, ha evidenziato la necessità di adeguare i livelli prestazionali delle unità tecnologiche all'evoluzione climatica. Le stime ambientali prevedono un aumento delle temperature globali di 1,5°C entro i prossimi due decenni dovute all'impatto delle emissioni di carbonio (IPCC, 2022).

formance realignment that buildings have to guarantee in order to achieve relational qualities appropriate to the urban context of reference. Focusing on decarbonisation processes in buildings (UE, 2021), scientific collaboration enabled the construction of an information, analysis and evaluation tool for energy-environmental performance based on the model drawn up by JRC Joint Research Centre (Murauskaitė-Bull and Caramizaru, 2021), to verify an adequate envelope design (Milardi, 2020). In line with European energy and climate change policies, the model supports impact assessments of building envelope performance with an advanced technological system on both the design process and the built environment. Therefore, from the interactions between envelope and context, through enabling technologies, the research yields with a systemic ration-

Il rapporto IPCC 2022, inerente ai diversi temi di efficienza e produzione energetica, di innovazione e integrazione delle lo-

giche *smart*, nonché di qualità ambientale degli edifici, ha evidenziato la necessità di adeguare i livelli prestazionali delle unità tecnologiche all'evoluzione climatica. Le stime ambientali prevedono un aumento delle temperature globali di 1,5°C entro i prossimi due decenni dovute all'impatto delle emissioni di carbonio (IPCC, 2022).

ale a tool represented by a "dynamic data sheet". The meaning of dynamicity, attributed to the latter, concerns the possibility of making it flexible and, therefore, updatable, according to changing data, parameters, and context. Among the main enabling technologies, defined by *Boston Consulting* and adopted in the National Plan "Impresa 4.0" of the Ministry of Economic Development<sup>1</sup> (MISE, 2020), research is part of the *Simulation* – simulation between intelligent and interconnected machines to increase productivity and process optimisation – and of *Horizontal/Vertical Integration* of information. The dynamic data sheet, through the analysis and use of material thermal conductivity parameters and heat flow transmission properties, makes it possible to determine the amount of CO<sub>2</sub> emissions during the usage phase<sup>2</sup>, as the main indicator of environmental

Nello scenario scientifico descritto l'ambito dei processi di decarbonizzazione degli edifici (UE, 2021) interessa, quindi, la capacità degli involucri edilizi di relazionarsi appropriatamente con il proprio contesto di riferimento, avvalendosi di strumenti multiscalari di informazione per l'adeguata trasformazione dell'ambiente costruito (Campioli, 2020). L'involucro denota un carattere di dualismo essendo sia elemento tecnico di un sistema tecnologico edilizio, che componente di controllo dei livelli di sostenibilità e scambio tra la scala architettonica e quella urbanistica (Brey, 2017). Le sfide climatiche interpretate come sollecitazioni critiche dell'intero sistema alla scala urbana, quali, a titolo esemplificativo, le *Urban Heat Island*, le *Heat Wave* e il *Pluvial Flooding* (European Agenda, 2020), rendono l'involucro edilizio oggetto studio per la mitigazione degli impatti. Al tempo, le esigenze e i requisiti richiesti dall'utenza, necessari al mantenimento di livelli prestazionali adeguati alle istanze del tempo, individuano nell'involucro edilizio un elemento di osmosi (transito e/o schermatura all'occorrenza) in risposta all'integrazione di soluzioni tecnologiche e vulnerabilità ambientali (Pinto and Viola, 2019).

L'innovazione delle funzionalità e delle componenti attive delle superfici dell'involucro indirizzano gli scenari di ricerca verso processi di trasformazione basati su tecnologie abilitanti, sfruttando il carattere responsivo dell'involucro stesso. Difatti, le tecnologie abilitanti individuate per questa ricerca, determinano un miglioramento nell'analisi del comportamento dell'involucro, riducendone sia gli impatti sull'ambiente costruito che i margini di errore in fase di progettazione e scelta tecnologica. Ciò grazie alla possibilità di simulazione del comportamento dei materiali/ componenti in base alle variazioni climatiche misurabili.

sustainability ICE – European Common Indicators (UE, 2021). This tool supports the evaluation of energy performance, verifying impact and performance delivered *ex ante/ex post* design (Pinto, 2019).

### Enabling technologies for the decarbonisation of buildings

The IPCC 2022 report, covering the various topics of energy efficiency and production, innovation and integration of a *smart* rationale, and the environmental quality of buildings, highlighted the need to adapt the performance levels of technological units to climate change. Environmental estimates predict a 1.5°C increase in global temperatures within the next two decades due to the impact of carbon emissions (IPCC, 2022).

In the scientific scenario described, the scope of the decarbonisation processes

of buildings (UE, 2021) thus concerns the ability of building envelopes to appropriately relate to their context, using multi-scalar information tools for the appropriate transformation of the built environment (Campioli, 2020). The envelope shows a character of dualism being both a technical element of a technological building system, and a component that controls sustainability levels and exchange between the architectural and urban scale (Brey, 2017). Climate challenges interpreted as critical stresses of the whole system at the urban scale, such as, but not limited to, the *Urban Heat Island*, the *Heat Wave* and the *Pluvial Flooding* (European Agenda, 2020), make the building envelope the object of study for impact mitigation. At the same time, the needs and requirements of users, necessary to maintain appropriate performance standards for the demands of the

## Metodologia e Materiali

Attribuendo un'accezione di *smartness* all'ottenimento delle informazioni a supporto delle scelte progettuali, la metodologia si articola secondo le fasi di analisi, elaborazione, verifica e validazione applicativa. L'obiettivo è determinare uno strumento di risposta applicabile alle diverse scale di azione inerenti ai fenomeni climatici, al risparmio energetico e alle emissioni di CO<sub>2</sub> attraverso processi di simulazione definiti dalle tecnologie abilitanti (Fig. 1).

La prima fase analizza la Direttiva Europea n.31/2010 e le successive integrazioni<sup>3</sup> che indirizzano verso la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> mediante indicatori noti e disponibili in letteratura (ISPRA, 2021). L'attenzione verso questo valore, parametro difficilmente reperibile in banche dati, risulta necessaria per la valutazione della compatibilità ambientale.

Assunti gli standard della normativa cogente per il soddisfacimento dei requisiti delle nuove qualità abitative (Lucarelli *et al.*, 2018), nella fase di elaborazione sono state considerate le informazioni energetiche relative ai materiali/componenti di sperimentazione per la costruzione di una "scheda tecnica dinamica". Detta scheda ha lo scopo di verificare le relazioni ambientali che intercorrono tra gli edifici e il proprio ambiente costruito, implementando la conoscenza prestazionale dei materiali e dei componenti rispetto al contesto di riferimento. L'innovazione che questo strumento apporta, sviluppato a partire dal dato certo della conducibilità termica<sup>4</sup>, restituisce il valore delle emissioni di CO<sub>2</sub> dell'involucro come *tool* a supporto degli indicatori di sostenibilità ambientale ICE – Indicatori Comuni Europei. A tale risultato si arriva attraverso un percorso di ricerca che definisce una procedura fisico-matematica<sup>5</sup> ba-

times, identify the building envelope as an element of osmosis (transit and/or shielding, as necessary) in response to the integration of technological solutions and environmental vulnerabilities (Pinto and Viola, 2019).

The innovation of the functions and active components of the envelope's surfaces directs research scenarios towards transformation processes based on enabling technologies, exploiting the responsive character of the envelope itself. In fact, the enabling technologies identified for this research determine an improvement in the analysis of the envelope's behaviour, reducing both its impact on the built environment and the margins of error in the design and technological choice phase. This is thanks to the possibility of simulating the behaviour of materials/components based on measurable climatic variations.

Attribuendo un'accezione di *smartness* all'ottenimento delle



sata sui parametri di conducibilità termica dei materiali e sulle proprietà di trasmissione di calore (Fig. 2).

Partendo da una prima applicazione della scheda dinamica, la fase di verifica è avvenuta sul piano metodologico e applicativo teorico sia a livello nazionale che internazionale: a livello italiano, simulando la risposta in un bando di concorso<sup>6</sup> come strumento di valutazione all'interno di un'analisi multicriteriale; a livello internazionale, come soglia di riferimento nella sperimentazione europea E-COST in Portogallo<sup>7</sup>. Tali applicazioni caratterizzano il seguente set di indicatori: Emissioni di CO<sub>2</sub>, Massa superficiale, Trasmittanza termica, Resistenza termica, Sfasamento e Attenuazione, in relazione al criterio di compatibilità ambientale e risparmio energetico. La ricerca si focalizza sulle Emissioni di CO<sub>2</sub> e sulla conducibilità termica, parametro del comportamento del materiale in relazione al calore.

### Methods and Materials

Attributing a smartness feature to the process of obtaining information to support design choices, the methodology consists of the phases of analysis, processing, verification, and applicative validation. The objective is to determine a response tool applicable to the different scales of action inherent to climatic phenomena, energy saving and CO<sub>2</sub> emissions through simulation processes defined by the enabling technologies. (Fig. 1).

The first phase analyses European Directive no. 31/2010 and subsequent supplements<sup>3</sup> directing towards the reduction of CO<sub>2</sub> emissions by means of known indicators available in the literature (ISPRA, 2021). The focus on this value, a parameter that is hard to find in databases, is necessary for the assessment of environmental compatibility of materials/components based on measurable climatic variations.

Assuming the standards of the mandatory regulations for meeting the requirements of the new housing qualities (Lucarelli *et al.*, 2018), energy information on the materials/components of experimentation was considered when drawing up a "dynamic data sheet". The purpose of this sheet is to verify the environmental relations between buildings and their built environment, implementing the performance knowledge of materials and components with respect to the reference context. The innovation this tool brings, developed from the certain data of thermal conductivity<sup>4</sup>, returns the value of the envelope's CO<sub>2</sub> emissions as a tool to support environmental sustainability indicators ICE – European Common Indicators. This is achieved through a research pathway that defines a physical-mathematical procedure<sup>5</sup> based on the thermal con-

ductivity parameters of materials and heat transfer properties (Fig. 2). Starting from an initial application of the dynamic data sheet, the verification phase took place on a methodological and theoretical application level both in the national and international scene. At national level, by simulating the response in a competition notice<sup>6</sup> as an evaluation tool within a multi-criteria analysis, and at international level, as a reference threshold in the European experiment E-COST in Portugal<sup>7</sup>. In relation to the criteria of environmental compatibility and energy efficiency, these applications characterise the following set of indicators: CO<sub>2</sub> Emissions, Surface Mass, Thermal Transmittance, Thermal Resistance, Phase Shift and Attenuation. The research focuses on CO<sub>2</sub> Emissions and Thermal Conductivity, an identifying parameter of material behaviour in relation to heat.

### Sperimentazione: validazione del processo e simulating come tecnologia abilitante

et al., 2021) su pacchetti già definiti in fase di verifica teorica, ora sviluppati nella pratica utilizzando le tecnologie abilitanti (*Simulating and Horizontal/Vertical Integration* by MISE, 2020).

Le attività sperimentali e di *testing* si sono focalizzate sul funzionamento fisico-tecnico finalizzato all'efficienza energetica, impiegando strumentazioni di analisi termofisica e grafica per la valutazione delle prestazioni fluidodinamiche dei diversi assetti tecnici.

L'attività sperimentale e di *testing* è stata effettuata presso un laboratorio specializzato<sup>8</sup> attraverso la cella di simulazione termodinamica per componenti sottoposti a stress caldo/freddo detta TEST CELL (Figg. 3, 4).

Il programma e ciclo dei test è stato effettuato secondo una procedura replicabile e sulla base degli standard normativi di riferimento<sup>9</sup>.

La sperimentazione avviene a partire dalla preparazione del campione e dal rilevamento di dati certi (conducibilità/condutività termica, trasmissione di calore) su n.1 provino sottoposto a temperature esterne opposte, caldo e freddo, monitorando il flusso termico che attraversa il componente. Quest'ultimo, da adottare anche negli interventi di recupero dell'ambiente costruito per il riallineamento prestazionale energetico e ambientale, è stato progettato sulla base di una delle soluzioni tecnologiche considerate nella fase di verifica prevedendo una posa

hot/cold stress known as TEST CELL (Figs. 3, 4).

The test programme and cycle were carried out according to a replicable procedure and based on reference regulatory standards<sup>9</sup>.

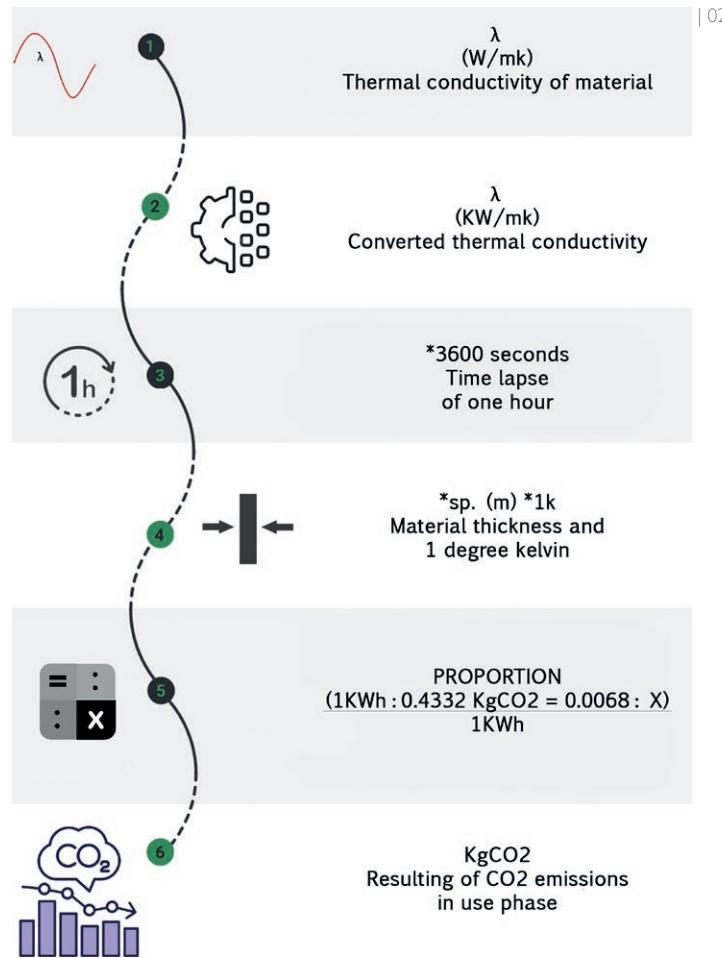
The experimentation starts with the preparation of the sample and the detection of certain data (conductivity/thermal conductivity, heat transmission) on no. 1 specimen subjected to opposite external temperatures, hot and cold, monitoring the thermal flow through the component. The latter, which is also to be adopted in interventions for the regeneration of the built environment for energy and environmental performance realignment, was designed on one of the technological solutions on which the verification was carried out, envisaging a dry installation. This element consists of an insulation panel (5 cm), a cavity (2.5

### Experimentation: process validation and simulation as enabling technology

At the experimental level, the validation of the dynamic data sheet was carried out at a later stage through testing and laboratory procedures (Lucarelli et al., 2021) on packages already defined in theoretical testing, now developed in practice using enabling technologies (*Simulating and Horizontal/Vertical Integration* by MISE, 2020).

Experimental and testing activities focused on physical-technical operation aimed at energy efficiency, using thermo-physical and graphical analysis instrumentation to assess the fluid-dynamic performance of the various technical setups.

The experimental and testing activity was carried out at a specialised laboratory<sup>8</sup> using the thermodynamic simulation cell for components subjected to



- 05| Andamento della temperatura dell'aria e superficiale della semicella calda e fredda, Autori  
 Air and surface temperature trends of the hot and cold half-cell, Authors

in opera a secco. Tale elemento è costituito da un pannello di coibente (5 cm); un'intercapedine (2,5 cm); un pannello di fibre di legno (2 cm).

La lettura dei dati viene effettuata grazie all'utilizzo di termocoppie con applicazione del termoflussimetro sul lato freddo del campione tramite punti ben definiti e riportati in maniera ribaltata, rispetto al piano orizzontale, sul lato caldo. Il monitoraggio del provino, durato 7 ore, ed il salvataggio dei dati, sono stati effettuati con intervalli di 30 secondi rispettivamente al set point caldo pari a 20 °C e set point freddo pari a 0 °C e con una posizione del deflettore di aria del 60%.

A questa procedura standardizzata è stata affiancata quella di valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub>, considerando i parametri sia della cella calda che fredda al fine di verificarne lo strumento e il comportamento del provino sottoposto a differenti ed estreme temperature (Fig. 5).

Osservando i grafici che mettono a confronto le temperature misurate da tutte le termocoppie sul campione, sia sul lato a stress caldo che su quello opposto, è evidente la condizione di partenza delle due temperature superficiali (tra i 12°C e i 13°C). Dopo la prima ora di test le temperature sui due lati raggiungono i target di riferimento (20°C e 0°C), rimanendo così costanti per le successive 6 ore di monitoraggio. Ad ogni termocoppia posta sul lato freddo ne corrisponde una sul lato caldo simulando due differenti condizioni climatiche.

Per semplificazione si riportano i dati inerenti la termocoppia centrale di riferimento (9cf), denominata per comodità Termocoppia A, con il rispettivo differenziale termico  $\Delta T$ , dato importante per analizzare il comportamento del provino durante la trasmissione di calore (Tab. 1).

cm), and a wood fibre panel (2 cm). The data were read out by means of thermocouples with the heat flow meter applied to the cold side of the specimen by means of well defined points offset from the horizontal plane on the hot side. Specimen monitoring for 7 hours, and data saving were carried out with 30-second intervals at the hot set point of 20°C and the cold set point of 0°C, respectively, and with an air baffle position of 60%.

This standardised procedure was flanked by the evaluation of CO<sub>2</sub> emissions, considering both hot and cold cell parameters to verify the instrument and the behaviour of the specimen subjected to different and extreme temperatures (Fig. 5).

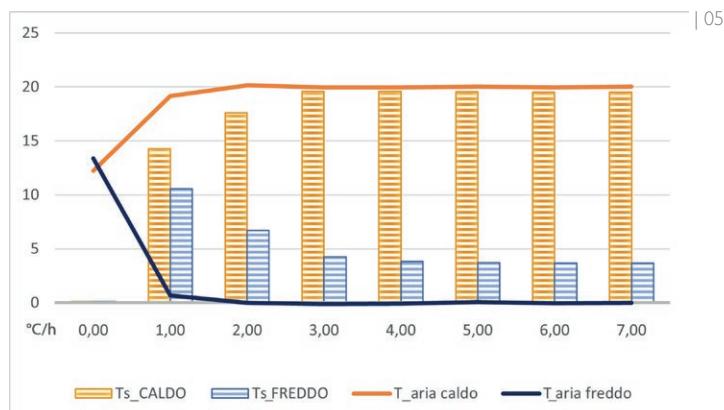
Looking at the graphs comparing the temperatures measured by all thermocouples on the sample, both on the hot stress side and on the opposite side,

the starting condition of the two surface temperatures (between 12°C and 13°C) is evident. After the first hour of testing, the temperatures on the two sides reach the reference targets (20°C and 0°C), and remain so for the next 6 hours of monitoring. It is important to note that each thermocouple on the cold side corresponds to one on the hot side, thus simulating two different climatic conditions.

For the sake of simplification, the data for the central reference thermocouple (9cf), called Thermocouple A for convenience, is given with the respective thermal differential  $\Delta T$ , which is important for analysing the behaviour of the specimen during heat transfer (Tab. 1).

#### Results

The research returns both the "dynamic data sheet" tool and the development of a new procedure for analysing and



evaluating the energy performance of materials/components according to required standards.

The procedure, whether standardised or protocol-based, was conducted experimentally by stressing the specimen and processing the data obtained in the laboratory. Therefore, the data sheet developed and described above is applied, analysing the behaviour of the individual layers of the component for the purpose of calculating CO<sub>2</sub> emissions during the usage phase (Fig. 6). The sheet in question shows that the

specimen considered, taken from the theoretical studies conducted and defined, has low CO<sub>2</sub> emissions and that the value is close to the theoretical application carried out in the verification phase, equal to 0.0041 kgCO<sub>2</sub>. Therefore, the sheet is validated by laboratory experimentation and applicable for both the energy requalification of existing and new buildings in different reference contexts. The validation shows the possibility of integrating the enabling technologies (Simulation and Horizontal/Vertical Integration), implementing

SPECIMEN			
	HOT	COLD	$\Delta T$
Thermocouple A	17,16	4,91	12,25

## Risultati

La ricerca restituisce sia lo strumento della "scheda tecnica dinamica", sia lo sviluppo di una nuova procedura di analisi e valutazione delle *performance* energetiche di materiali/componenti secondo apparati normativi richiesti. L'iter procedurale, normato o protocollare, è stato condotto a livello sperimentale sollecitando il provino ed elaborando i dati ottenuti in laboratorio. Pertanto, si applica la scheda tecnica sviluppata e sopra descritta, analizzando il comportamento dei singoli strati del componente ai fini del calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub> durante la fase di utilizzo (Fig. 6).

Dalla scheda in questione si evince che il provino considerato, assunto dagli studi teorici condotti e sopra definiti, ha basse emissioni di CO<sub>2</sub> e che il valore è vicino all'applicazione teorica effettuata in fase di verifica, pari a 0.0041 KgCO<sub>2</sub>. Pertanto, la scheda risulta validata dalla sperimentazione in laboratorio e applicabile sia per la riqualificazione energetica dell'esistente che per le nuove costruzioni in differenti contesti di riferimento. La validazione dimostra la possibilità di integrare le tecnologie abilitanti (*Simulation and Horizontal/Vertical Integration*), implementando la procedura utilizzata dai software per sviluppare attività di *simulating* specifiche prima di arrivare in laboratorio a testare il provino. Il *tool*, agendo nell'ambito del *Simulation e Horizontal/Vertical Integration*, si pone al servizio dei processi di acquisizione delle informazioni utili ad incrementare le prestazioni oltre la soglia di accettabilità, per determinare nuovi comportamenti qualitativi dell'involucro e dell'ambiente costruito.

the procedure used by the software to develop specific simulating activities before arriving at the laboratory to test the specimen. Operating in the Simulation and Horizontal/Vertical Integration area, the tool serves processes that acquire useful information to enhance performance beyond the threshold of acceptability in order to determine new qualitative behaviours of both the envelope and the built environment.

## Conclusions and possible future developments

The relationships between the issues investigated, the parameters and indicators of context influence, with respect to the energy behaviour of the envelope, constitute an innovative way of interpreting energy performance in relation to the built environment.

The result's original features determine the progress of scientific knowledge in

the sector, concerning the adequacy of the envelope and the appropriateness of its performance and technological potential.

The product of the research, which looks at the main recipients and responsible actors of the transformation and conservation actions of the built environment, becomes an informed and voluntary decision-supporting tool, which can be used in the different phases of the building process (planning/governance, design, construction, operation and maintenance). Therefore, there is a multidisciplinary involvement covering the processing, laboratory, and usage phase. Indeed, on the one hand, professionals can use the energy performance assessment sheet; on the other hand, public administrations can use it as an information tool to verify the impact and performance delivered ex ante/ex post design.

Specimen		N°	Layer	Thermal Conductivity W/mK	06
	1	Expanded polystyrene insulation by 5 cm		0,038	
	2	Air gap by 2,5cm		0,150	
	3	Wood panel cladding by 2cm		0,042	
Expanded polystyrene insulation by 5 cm					
$\lambda$ (W/mk)	$\lambda$ (KW/mk)	*3600 seconds	*sp. (m) *1k	PROPORTION	KgCO <sub>2</sub>
0.038	0.000038	0.137	0.0068	$\frac{1KWh : 0.4332 \text{ KgCO}_2 = 0.0068 : X}{1KWh}$	0.0029
Wood panel cladding by 2cm					
$\lambda$ (W/mk)	$\lambda$ (KW/mk)	*3600 seconds	*sp. (m) *1k	PROPORTION	KgCO <sub>2</sub>
0.042	0.000042	0.1512	0.003	$\frac{1KWh : 0.4332 \text{ KgCO}_2 = 0.003 : X}{1KWh}$	0.0013
Results					
Total CO <sub>2</sub> emissions of the specimen 0.0029 + 0.0013 = 0.0042 KgCO <sub>2</sub>					

The proposed result is configured as a tool that is shared, even simultaneously, by the different actors involved in the building process through the possibility of recording, consulting, and updating parameter sets at different scales of reading.

The research also provides a basis for the development of further scenarios aimed at obtaining more exhaustive information on the energy performance of materials/components, validating the use of enabling technologies. The latter make it possible to converge physical production (in this case the reference envelope and object of experimentation) and digital production (dynamic data sheet and laboratory wizard systems).

The implications for the construction industry become an opportunity for future developments, such as additional factors influencing the overall

energy performance of the building: time, durability, and ageing of materials; cost analysis and evaluation; material/component maintenance and management, its influence on building performance, cost, and overuse.

The replicability and large scale observation of the tool's outcomes makes it possible to identify the minimum energy performance of the components and the best design alternatives based on the reference context.

## ATTRIBUTIONS AND AWARDS

Introduction (F.C.; C.C.M.), State of the art (F.C.; C.C.M.); Methodology (F.C.; C.C.M.); Experimentation (F.C.; C.C.M.); Results (F.C.; C.C.M.); Conclusions (F.C.; C.C.M.).

F.C. is the winner of European Cooperation in Science and Technologies Grant CA16209 (30-05-2021/30-08-2021 – Polytechnic of Coimbra), 2022.

## Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Le relazioni fra le problematiche indagate, i parametri e gli indicatori di influenza del contesto, rispetto al comportamento energetico dell'involucro, costituiscono una modalità innovativa di lettura delle prestazioni energetiche in relazione all'ambiente costruito.

L'originalità del risultato determina l'avanzamento delle conoscenze scientifiche di settore nell'ambito dell'adeguatezza dell'involucro, dell'appropriatezza delle sue performance e del potenziale tecnologico.

Il prodotto della ricerca, che guarda ai principali destinatari, nonché attori responsabili delle azioni di trasformazione e conservazione dell'ambiente costruito, diventa uno strumento di supporto decisionale consapevole e volontario utilizzabile nelle diverse fasi del processo edilizio (programmazione/governance, progettazione, costruzione, gestione e manutenzione). Pertanto, esiste un coinvolgimento multidisciplinare che riguarda la fase di elaborazione, di laboratorio e di utilizzo: da un lato i professionisti possono utilizzare la scheda per la valutazione delle prestazioni energetiche; dall'altro, le pubbliche amministrazioni, come strumento di informazione per verificare gli impatti e le *performance* erogate *ex ante/ex post* progettazione.

Il *tool* proposto si configura come strumento condiviso, anche simultaneamente, dai diversi attori coinvolti nel processo edilizio attraverso la possibilità di registrazione, consultazione e aggiornamento dei set di parametri a differenti scale di lettura. La ricerca rappresenta, inoltre, una base per lo sviluppo di ulteriori scenari finalizzati all'ottenimento di una maggiore completezza delle informazioni sulle prestazioni energetiche dei materiali/componenti, validando l'utilizzo delle tecnologie abi-

C.C.M. is an expert in laboratory techniques for research in testing building façade elements.

### NOTES

<sup>1</sup> The enabling technologies incorporated by MISE in the National Plan "Impresa 4.0" are Advanced manufacturing solutions (technologically advanced, interconnected and modular, flexible and high performance production systems); Additive manufacturing (production systems that increase the efficiency of material use); Augmented reality (use of augmented reality vision systems to support production processes); Simulation (simulation between intelligent and interconnected machines to increase productivity and optimise processes); Horizontal/Vertical Integration (integration of information and data between all areas of the production chain, from supplier to

end consumer); Industrial internet and IoT (multidirectional communication both internally and externally between elements of production through the Internet); Cloud (deployment and implementation of cloud computing and data management solutions on open systems); Cyber-security and business continuity (new security and data protection standards); Big data and analytics (analysis of large amounts of data to optimise production processes).

<sup>2</sup> Estimates of future CO<sub>2</sub> emissions from existing fossil fuel infrastructure already exceed the remaining net cumulative CO<sub>2</sub> emissions in pathways limiting warming to 1.5°C (with >50% probability) with no or limited overshoot<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> 2012/27/UE ("EED" Energy Efficiency Directive), revision of 2018, in which the EPBD and EED were amended by the Directive (UE)

litanti. Queste ultime permettono di far convergere la produzione fisica (in questo caso l'involucro di riferimento e oggetto di sperimentazione) e quella digitale (scheda tecnica dinamica e sistemi *wizard* laboratoriali).

Le ricadute nel settore delle costruzioni diventano occasione di sviluppi futuri; basti pensare ad ulteriori fattori influenti sulla prestazione energetica globale dell'edificio, quali: il tempo, la durata e l'invecchiamento dei materiali; l'analisi e la valutazione dei costi; la manutenzione e gestione del materiale/componente e l'influenza che essa ha sulle prestazioni, sui costi e sull'iper-utilizzo dell'edificio. La replicabilità e l'osservazione su larga scala degli esiti dello strumento consente di individuare le prestazioni energetiche minime dei componenti e le migliori alternative progettuali in base al contesto di riferimento.

### ATTRIBUZIONI E RICONOSCIMENTI

Introduzione (F.C.; C.C.M.); Stato dell'arte (F.C.; C.C.M.); Metodologia (F.C.; C.C.M.); Sperimentazione (F.C.; C.C.M.); Risultati (F.C.; C.C.M.); Conclusioni (F.C.; C.C.M.).

F.C. è vincitrice del Grant *European Cooperation in Science and Technologies CA16209* (30-05-2021/30-08-2021 – Polytechnic of Coimbra), 2022.

C.C.M. è esperta in tecniche di laboratorio per la ricerca nel testing su elementi di facciata degli edifici.

### NOTES

<sup>1</sup> Le tecnologie abilitanti recepite dal MISE nel Piano Nazionale "Impresa 4.0" sono *l'Advanced manufacturing solutions* (sistemi di produzione tecnologicamente avanzati, interconnessi e modulari, flessibili e performanti); *l'Additive manufacturing* (sistemi di produzione che aumentano l'efficienza

2018/844, which had to be transposed by 10 April 2020. The Commission also developed additions to the EPBD in December 2021 through comments and recommendations.

<sup>4</sup> Specific property of each material that is defined as the "amount of heat transmitted through 1 m<sup>2</sup> of a material with a thickness of 1 metre for  $\Delta T = 1$  K (1 Kelvin)".

<sup>5</sup> Starting with the thermal conductivity of the individual materials, a conversion from W to KW is made for each value and multiplied by 3600 seconds (time interval of 1 hour). Based on the definition of thermal conductivity (UNI, 1994), the value is multiplied by  $\Delta T = 1$  K (1 Kelvin) and the thickness. Finally, a proportion is defined to obtain the result of the calculation of CO<sub>2</sub> emissions during the usage phase.

<sup>6</sup> Notice of Competition for the Re-development of Public Buildings,

concerning the works of executive design, renovation and adaptation of the compendium located in Via Marcello Boglione, Rome, 2014.

<sup>7</sup> European Cooperation in Science and Technologies CA16209 (30-05-2021/30-08-2021 – Polytechnic of Coimbra), 2022.

<sup>8</sup> The research was developed at the laboratory specialised in AAMA/ASTM and UNI EN tests and simulations on envelopes and façades.

<sup>9</sup> EN ISO 6946 (Thermal conductance of opaque walls in steady state); UNI 7891 (Determination of thermal conductivity using the heat flowmeter method); UNI EN 12664:2002 (Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance using the hot plate method with guard ring and the thermal mass flow meter method).

di utilizzo dei materiali); *l'Augmented reality* (utilizzo di sistemi di visone a realtà aumentata a supporto dei processi produttivi); la *Simulation* (simulazione tra macchine intelligenti e interconnesse per aumentare la produttività e ottimizzare i processi); *l'Horizontal/Vertical Integration* (integrazione di informazioni e dati tra tutte le aree della filiera produttiva); *l'Industrial internet e IoT* (comunicazione multidirezionale sia interna che esterna tra gli elementi della produzione attraverso internet); il *Cloud* (diffusione e implementazione di soluzioni di *cloud computing* e di gestione dei dati su sistemi aperti); il *Cyber-security e business continuity* (nuove norme di sicurezza e protezione dati); il *Big data and analytics* (analisi di grandi quantità di dati per ottimizzare i processi di produzione).

<sup>2</sup>Le stime delle future emissioni di CO<sub>2</sub> dalle infrastrutture esistenti di combustibili fossili superano già le rimanenti emissioni nette cumulative di CO<sub>2</sub> nei percorsi che limitano il riscaldamento a 1,5°C (con probabilità >50%) con *overshoot* nullo o limitato”.

<sup>3</sup> 2012/27/UE “EED” *Energy Efficiency Directive*, rev. 2018 dove EPBD ed EED sono state modificate dalla Direttiva (UE) 2018/844, che doveva essere recepita entro il 10 aprile 2020. La Commissione nel 2021 ha, inoltre, sviluppato integrazioni alla EPBD con osservazioni e raccomandazioni.

<sup>4</sup> Proprietà specifica di ciascun materiale che si definisce come la “quantità di calore trasmesso attraverso 1mq di un materiale avente spessore di 1m per un ΔT = 1K (1 Kelvin)”.

<sup>5</sup> A partire dalla conducibilità termica dei singoli materiali si effettua una conversione da W a KW per ogni valore e si moltiplica per 3600 secondi (intervallo di tempo di 1 ora). Sulla base della definizione della conducibilità termica (UNI, 1994) si moltiplica il valore per ΔT = 1K (1 Kelvin) e per lo spessore. Infine, si effettua una proporzione per potere arrivare al risultato del calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub> durante la fase d’uso.

<sup>6</sup> Bando di Concorso per la riqualificazione di edifici pubblici inerente i Lavori di progettazione esecutiva, ristrutturazione e adeguamento del compendio sito in Via Marcello Boglione a Roma, 2014.

<sup>7</sup> European Cooperation in Science and Technologies CA16209 (30-05-2021/30-08-2021 – Polytechnic of Coimbra), 2022.

<sup>8</sup> La ricerca è stata sviluppata presso il laboratorio specializzato in test e simulazioni AAMA/ASTM e UNI EN su involucri e facciate.

<sup>9</sup> EN ISO 6946 (Conduttanza termica di pareti opache in regime stazionario); UNI 7891 (Determinazione della conduttività termica con il metodo del termoflussimetro); UNI EN 12664:2002 (Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia – Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termo-flussimetro).

## REFERENCES

Antonini, E., Boeri, A., Lauria, M. and Giglio, F. (2020), “Reversibility and Durability as Potential Indicators for Circular Building Technologies”, *Sustainability*, Vol. 12, pp. 1-14.

ARUP (2021), “Annual Report 2021 Creating Sustainable Futures”, ARUP Deutschland Publisher GmbH, available at: <https://www.arup.com/annual-report-2021> (accessed on 28/07/2022).

Brey, P. (2017), *The strategic role of technology in a good society: Technology in Society*, Elsevier Editor, London, UK.

Campioli, A. (2020), “Tecnologie e cultura del progetto nella società delle mangrovie”, in Perriccioli, M.; Rigo, M.; Russo Ermolli, S. and Tucci, F.

(Ed.), *Il progetto nell'era digitale. Tecnologia, Natura, Cultura*. Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 68-70.

Ciampa, F. (2021), “Processi ibridi: l'integrazione tecnologica come attante del progetto d'architettura”, *Techne*, Vol. 21, pp. 249-255.

COM/2020/950 “Relazione 2020 sullo stato dell'Unione dell'energia in applicazione del regolamento (UE) 2018/1999 sulla governance dell'Unione dell'energia e dell'azione per il clima”, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=COM:2020:950:FIN> (accessed on 25/07/2022)

European Agenda (2020), “N.U. Habitat III New Urban Agenda: Quito Declaration on Sustainable Cities and Human Settlements for All”, Habitat III Conf. Bruxelles.

Gunal, M.M. (2019), *Simulation for Industry 4.0: Past, Present, and Future*. Springer Nature, Switzerland.

IPCC (2022), “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change”, available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (accessed on 28/07/2022).

ISPRA (2021), “Banca dati degli indicatori ambientali”, available at: <https://www.isprambiente.gov.it/it/amministrazione-trasparente/altri-contenuti/g8-open-data/>.

Lucarelli, M.T., Mussinelli E. and Daglio L. (2018), *Progettare resiliente*, Maggioli editore, Milano.

Lucarelli, M.T.; Milardi, M.; Mandaglio, M. and Musarella, C. C. (2021), “Controllo prestazionale del rapporto edificio-contesto. Esperienze di testing avanzato”, in Bologna, R.; Losasso, M.; Mussinelli, E. and Tucci, F. (Ed.), *Dai distretti urbani agli eco-distretti. Metodologie di conoscenza, programmi strategici, progetti pilota per l'adattamento climatico*, Maggioli Editore, Rimini, pp. 294-334.

Milardi, M. (2020), “Strategie di controllo termico adattivo su sistemi di involucro. Smartwall”, *Techne*, Vol. 20, pp. 314-318.

MISE – Ministero dello Sviluppo Economico (2020), “Piano Nazionale ‘Impresa 4.0’”. Available at: [https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/guida\\_industria\\_40.pdf](https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/guida_industria_40.pdf) (accessed on 28/07/2022).

Murauskaite-Bull, I. and Caramizaru, E. (2021), “Energy taxation and its societal effects”, Publications Office of the European Union, Luxembourg, available at: 10.2760/223415 (accessed on 28/07/2022).

Pinto, M. R. (2019), *Coordinare le conoscenze per la manutenzione del patrimonio culturale/ Knowledge management for cultural heritage maintenance*. Napoli, CLEAN.

Pinto, M.R. and Viola, S. (2019), “Processi di rigenerazione per la decarbonizzazione dell'ambiente costruito. Progettualità in transizione: Parma, capitale italiana della cultura 2020”, *BDC*, Vol. 19, pp. 417-440.

UE (2021), “Regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio del 12 febbraio 2021 che istituisce il dispositivo per la ripresa e la resilienza”, available at: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/241/oj> (accessed on 25/07/2022).

Viola, S. and Gehl, J. (2019), “Città per le persone”, *Techne*, Vol. 17, pp. 81-86.

Zaffagnini, M. (1981), *Progettare nel processo edilizio*, Parma Editore, Parma, IT.

Sara Codarin, <https://orcid.org/0000-0003-2310-821X>

College of Architecture and Design, Lawrence Technological University, Southfield, Michigan, United States

scodarin@ltu.edu

**Abstract.** Lo stato di avanzamento tecnologico dell'automazione robotica nelle costruzioni permette di individuare una rinnovata agenda progettuale al punto di confluenza tra professione, ricerca accademica, *higher-education* e contesto culturale in cui le innovazioni hanno luogo. Il presente contributo delinea una ricerca svolta nell'ambito della fabbricazione digitale robotica additiva alla scala architettonica presso il College of Architecture and Design della Lawrence Technological University in collaborazione con lo studio Daub e la start-up Citizen Robotics in Metro Detroit. La realizzazione di un prototipo per un'installazione temporanea ha posto le basi per lo studio di fattibilità di una residenza di cui parte dell'involucro verrà stampato in 3D e la cui realizzazione è prevista nel corso del 2023.

**Parole chiave:** Fabbricazione digitale robotica; Stampa 3D; Design computazionale; Robotica additiva; Trasformazione digitale nei flussi di lavoro.

## Introduzione e contesto culturale

### *Il settore delle costruzioni nel quadro globale*

L'attuale sviluppo della Quarta

Rivoluzione Industriale nelle economie trainanti del mondo, intesa come l'insieme dei progressi smart nell'ambito dell'automazione industriale (Oesterreich *et.al.*, 2016; Schwab, 2017), ha fatto emergere dei limiti afferenti al settore delle costruzioni, il quale da sempre tende ad opporre resistenza all'appropriazione di innovazioni tecnologiche capaci di influire su efficienza e produttività dei processi. A oggi, l'offerta di forza lavoro per le attività di cantiere è inferiore alla crescente domanda, in quanto i lavori edili non sono attrattivi ma percepiti come 4D – *dull, dirty, dangerous e difficult*, ovvero banali, sporchi, pericolosi e difficoltosi (Keramas, 1998). Sebbene l'edilizia registri un valore globale in crescita di 7,3 triliardi di dollari<sup>1</sup>, la convergenza di fattori come l'aumento del costo di materiali e manodopera<sup>2</sup>, la diminuzione del costo dell'automazione<sup>3</sup> e la contrazione della

## Enhancing the workforce in construction: robotic concrete printing in Detroit

**Abstract.** The technological advancement of robotic automation in construction allows for the identification of a renewed design agenda at the intersection of professional practice, academic research, higher education, and the cultural context in which innovations take place. This paper outlines research conducted in the field of large scale digital robotic additive manufacturing at Lawrence Technological University, College of Architecture and Design, in collaboration with the architecture firm Daub and the start-up Citizen Robotics in Metro Detroit. The creation of a prototype for a temporary installation is used to assess the building feasibility of a home scheduled for completion in 2023, in which a portion of the exterior will be 3D printed.

**Keywords:** Additive manufacturing; Robotics; 3D printing; Computational design; Digital transformation.

disponibilità di maestranze qualificate richiede un approccio strategico nella formazione di nuove competenze professionali necessarie all'interno della filiera (Vial, 2021).

In questo sistema complesso, la robotizzazione può essere trasformativa nello strutturare il lavoro edile come professione intellettuale ove le macchine estendono le capacità umane tra mondo digitale e fisico (Daugherty and Wilson, 2018). In tal senso, in Europa, il programma euRobotics<sup>4</sup>, incentiva meccanismi per rafforzare competitività e promozione dell'impiego multi-settoriale di tecnologie robotiche finalizzate alla produzione customizzata nell'economia di scala. A livello internazionale, la necessità di riformare le competenze caratterizzanti il mercato del lavoro è espressa nell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite definita dai 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile<sup>5</sup>. La presente discussione si allinea, in modo particolare, agli obiettivi 8, 9 e 11 (Guenat *et.al.*, 2022) che riguardano crescita economica, industrializzazione innovativa e accesso a città resilienti ed inclusive.

### *Test-bed operativo in Metro Detroit*

Lo Stato del Michigan, e nello specifico l'area metropolitana di Detroit, ha un ruolo centrale in relazione al contesto culturale in cui questo lavoro s'inserisce. Con oltre 15 mila robot installati in ambiente industriale ed una proporzione di 8,5 robot ogni mille lavoratori, Detroit è una delle città con la più alta concentrazione di robot negli Stati Uniti<sup>6</sup>. Per inquadrare questo dato in un contesto più ampio, un report dell'*International Federation of Robotics* dimostra che, nel 2021, la densità di strumenti di automazione per mille operai nell'industria manifatturiera risultava pari a 93.2 in Corea del Sud, 25.5 negli USA e,

## Introduction and cultural background

### *The construction sector in the global framework*

The current development of the Fourth Industrial Revolution in the world's leading economies, described as the set of intelligent advancements in industrial automation (Oesterreich *et.al.*, 2016; Schwab, 2017), has revealed inherent limitations in the construction sector. Such limitations are due to the long-standing resistance to adopting technological innovations that could increase efficiency and productivity. Moreover, a noticeable labour shortage in construction jobs results from the industry being viewed as unattractive and perceived as 4D – dull, dirty, dangerous, and difficult (Keramas, 1998). Although the construction sector registers a global value of 7.3 trillion dol-

lars, the convergence of factors such as the increasing cost of materials and labour, the decreasing cost of automation, and the declining availability of skilled labour, requires a strategic approach to training new professional skills necessary within the industry (Vial, 2021).

In this intricate system, robotics can revolutionise the construction industry by making it an intellectually demanding profession where machines augment human abilities between digital and physical realms (Daugherty and Wilson, 2018). To that end, the euRobotics programme in Europe fosters mechanisms to boost competitiveness and promote the multi-sectoral use of robotic technology for customised production at scale. In addition, the United Nations 2030 Agenda, with its 17 Sustainable Development Goals, calls for reforms in labour market

in ordine decrescente nello scenario europeo, 37.1 in Germania, 28.9 in Svezia, 24.6 in Danimarca e 22.4 in Italia<sup>7</sup>. Data la forza trainante dell'industria pesante in Michigan e di quella automobilistica a Detroit, la capacità produttiva industriale è parte integrante del patrimonio culturale locale.

Tuttavia, nonostante il recente trasferimento tecnologico in architettura di workflow e strumenti derivanti dalle filiere della produzione seriale ai fini della customizzazione automatizzata (Carpo, 2017), si individua la carenza di un'infrastruttura in grado di diffondere conoscenza tecnologica collettiva nelle articolazioni granulari della comunità di Metro Detroit. Questa premessa definisce la motivazione per contribuire a promuovere *know-how* tecnologico e opportunità per l'*upskill* professionale tramite la ricerca d'innovazione nei processi progettuali e costruttivi in un sistema interconnesso caratterizzato da fattori ambientali, accademici, sociali, simbolici e culturali.

### **Obiettivi e metodologia: sistemi automatizzati e opportunità per il design**

tra accademia, professione e industria attraverso il coinvolgimento del College of Architecture and Design della Lawrence Technological University (LTU-CoAD, Detroit, Michigan), lo studio di architettura Daub e il fab-lab Citizen Robotics<sup>8</sup>, un laboratorio-officina che sviluppa servizi di fabbricazione digitale finalizzati ad impattare positivamente l'ambiente costruito in Metro Detroit fornendo accesso a robot e formazione sul territorio, nelle sue accezioni materiale e sociale.

L'attività è consistita nello sviluppare un flusso di lavoro basa-

Il presente contributo espone gli esiti preliminari di una ricerca attualmente in corso che risulta da una collaborazione

skills. The discussion featured in this paper aligns particularly with Goals 8, 9, and 11 (Guenat *et al.*, 2022), which address economic growth, innovative industrialisation, and access to resilient and inclusive cities.

#### *A testbed in Metro Detroit*

The State of Michigan, specifically the Detroit metropolitan area, plays a central role due to the cultural context in which this work is carried out. With over 15,000 robots installed in industrial settings and a ratio of 8.5 robots per thousand workers, Detroit is one of the cities with the highest concentration of robots in the United States. A report by the International Federation of Robotics indicates that in 2021, the density of automation tools per thousand workers in the manufacturing industry was equivalent to 93.2 in South Korea, followed by 25.5 in the

US, and decreasingly 37.1 in Germany, 28.9 in Sweden, 24.6 in Denmark, and 22.4 in Italy. Given the driving force of heavy industry in Michigan and the automotive industry in Detroit, industrial production capacity is a foundational component of the local cultural heritage. However, despite the recent technological transfer of workflow and tools in architecture from serial production lines to pursue automated customisation (Carpo, 2017), the Metro Detroit community lacks infrastructure that supports the dissemination of collective technological knowledge. This premise explains the motivation to promote technical expertise and professional development by exploring innovation in design and building processes in an interconnected system shaped by environmental, academic, social, symbolic, and cultural elements.

to sull'uso della robotica alla scala architettonica per realizzare componenti costruttive tramite fabbricazione additiva utilizzando materiale cementizio. Il processo si è suddiviso in due fasi:

- 1) studio di fattibilità preliminare attraverso la realizzazione di un prototipo stampato in 3D all'interno di un corso di progettazione offerto dal College of Architecture and Design;
- 2) affinamento delle capacità tecnologiche tramite la progettazione esecutiva di un'unità residenziale costituita da una componente di involucro stampata in 3D per la quale sono in corso test quantitativi di verifica della performance termico-strutturale.

Gli obiettivi si sono strutturati sulla base di contenuti specifici che afferiscono agli ambiti progettuale, processuale, formativo e normativo della ricerca, ovvero:

- la definizione di un'agenda progettuale *fabrication-aware* (Pottmann, 2013) che mantenga la variabilità delle proposte formali nonostante i limiti tecnici, sociali ed economici che ostacolano l'integrazione diffusa della robotica in ambienti dinamici come i cantieri edilizi (Fingrut and Lau, 2022);
- l'elaborazione di un workflow basato sulla continuità computazionale e di fabbricazione affinché la tecnologia non venga espressa come esternalità (Picon, 2022) bensì come risorsa fondativa del settore disciplinare;
- lo sviluppo di *know-how* tecnologico sul territorio attraverso l'istruzione superiore per consentire la formazione di designer e tecnici specializzati in grado di adattare flessibilmente macchine generiche come i robot a sequenzialità

### **Research objectives and methodology: automated systems and design opportunities**

This contribution outlines the preliminary results of current research resulting from a collaboration between academia, profession, and industry through the involvement of the College of Architecture and Design at Lawrence Technological University (LTU-CoAD), the architecture firm Daub and the fab-lab Citizen Robotics. This fab-lab develops digital manufacturing services aimed at positively impacting the built environment in Metro Detroit by providing access to robots and training in both material and social factors.

The activity involved developing a workflow based on the use of robotics at the architectural scale to produce building components through additive manufacturing using cement-based

materials. The process was divided into two phases:

- 1) preliminary feasibility study through the creation of a 3D printed prototype in a design course offered at the College of Architecture and Design;
- 2) refinement of technological capabilities through the design and execution of a residential unit consisting of a 3D printed envelope component for which quantitative performance and thermal-structural tests are ongoing.

The objectives were structured based on specific content pertaining design process, digital workflow, culture of education, and regulatory aspects of the research, namely:

- defining a fabrication-aware design agenda (Pottmann, 2013) that maintains the variability of a design proposal despite the technical, so-

operative mono e multi-objettivo; l'individuazione di specificità tecnologiche nell'implementazione di unità costruttive da utilizzare come leva per contribuire a colmare le lacune del regolamento edilizio locale e del codice delle costruzioni.

Tale compendio ha costituito una linea guida per impostare i processi decisionali nelle fasi di ideazione creativa, settaggio tecnico e concretizzazione materica delle proposte progettuali illustrate in seguito.

### Stato dell'arte della tecnologia: caratteristiche della stampa 3D robotica su larga scala

Nel palinsesto di ricerche promosse dall'*Association for Computer Aided Design in Architecture*<sup>9</sup>, una delle fonti *peer-reviewed* più autorevoli nell'ambito della ricerca computazionale e fabbricazione digitale, è possibile determinare il percorso metodologico delle sperimentazioni robotiche additive in architettura. Nell'archivio degli atti di convegno, dal 1985, la dicitura *large scale manufacturing* si riscontra per la prima volta in un contributo del 2009 in cui vengono esaminate le tecnologie ingegneristiche di stampa 3D in grado di sviluppare processi su larga scala per la produzione di componenti costruttivi e, potenzialmente, architettonici (De Kestelier and Buswell, 2009). Tra questi sistemi, vengono individuati il *contour crafting* (Khoshnevis *et.al.*, 2006), il *powder-bed deposition* (Morgante, 2011) e l'estruzione robotica di materiali cementizi, o *concrete printing* (De Kestelier, 2011). Attraverso una disamina dello sviluppo tecnologico nel settore manifatturiero, i processi additivi vengono descritti come manifestazione esplicita della connessione tra digitale e fisico che per-

Nel palinsesto di ricerche promosse dall'*Association for Computer Aided Design in Architecture*<sup>9</sup>, una delle fonti *peer-reviewed* più autorevoli nell'ambito della ricerca computazionale e fabbricazione digitale, è possibile determinare il percorso metodologico delle sperimentazioni robotiche additive in architettura. Nell'archivio degli atti di convegno, dal 1985, la dicitura *large scale manufacturing* si riscontra per la prima volta in un contributo del 2009 in cui vengono esaminate le tecnologie ingegneristiche di stampa 3D in grado di sviluppare processi su larga scala per la produzione di componenti costruttivi e, potenzialmente, architettonici (De Kestelier and Buswell, 2009). Tra questi sistemi, vengono individuati il *contour crafting* (Khoshnevis *et.al.*, 2006), il *powder-bed deposition* (Morgante, 2011) e l'estruzione robotica di materiali cementizi, o *concrete printing* (De Kestelier, 2011). Attraverso una disamina dello sviluppo tecnologico nel settore manifatturiero, i processi additivi vengono descritti come manifestazione esplicita della connessione tra digitale e fisico che per-

cial, and economic limitations that hinder the widespread integration of robotics in dynamic environments such as construction sites (Fingrut and Lau, 2022);

- defining a workflow based on computational and manufacturing continuity so that technology is not expressed as an externality (Picon, 2022) but as a foundational resource of the discipline;
- developing technological know-how in the territory through higher education to enable the training of designers and professionals specialised in adapting generic machines, such as robots, to mono and multi-objective operational sequences;
- identifying technological specificities in the implementation of construction units to be used as leverage to help close gaps in local building regulations and construction codes.

This body of work served as a guideline for decision-making processes in the creative ideation, technical setup, and material realisation phases of the projects illustrated below.

**State of the art of technology: features of large-scale robotic 3D printing**  
Within the research promoted by the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA), it is possible to determine the methodological path of additive robotic experiments in architecture over time. ACADIA is a well respected source in the field of computational research and digital fabrication. The conference proceedings archive, dating back to 1985, mentions large-scale manufacturing for the first time in a 2009 paper that examines 3D printing engineering technologies capable of producing construction components, including

mette di ampliare la *palette* progettuale di architetti e designer attraverso un'inedita libertà geometrica (De Kestelier and Buswell, 2009).

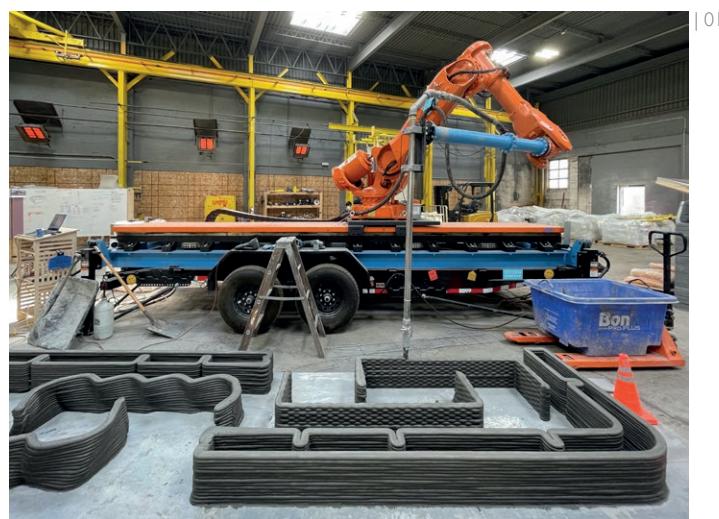
Dagli anni 2010, si sono sviluppate ulteriori modalità tecniche (Naboni and Paoletti, 2015; Craveiroa *et.al.*, 2019), come la tecnologia delta di Wasp<sup>10</sup>, i manipolatori meccanici di Apis Cor<sup>11</sup> o droni programmati per depositare strati di polimeri cementizi<sup>12</sup>. A differenza di questi strumenti, l'estruzione robotica a sei o sette assi ha il vantaggio di essere implementabile con setup standard e permettere una customizzazione flessibile dello spazio di lavoro grazie alla versatilità dei robot industriali. Sperimentazioni recenti hanno riguardato l'uso di materiali come terra cruda<sup>13</sup>, biopolimeri a base di cellulosa<sup>14</sup>, idrogel<sup>15</sup> e combinazioni multi-materiale (Mostafavi *et.al.*, 2019). Ciò nonostante, l'effettiva applicabilità nel settore delle costruzioni oggi si limita all'uso di malte e impasti cementizi, in quanto più facilmente reperibili e certificabili (si vedano la DFab House o i progetti realizzati da Besix3D, Vertico, XtreeE, TwenteAM). Il setup tecnico di Citizen Robotics (Fig. 1) è stato definito sulla base di sistemi già consolidati, in modo da inserirsi in un contesto favorevole allo scambio di informazioni e diffusione della conoscenza da trasferire sul territorio. La tecnologia a disposizione del fab-lab include un robot industriale ABB a sette assi installato su una piattaforma mobile. Il robot è equipaggiato con un estrusore per la fabbricazione additiva collegato al meccanismo di carico del materiale<sup>16</sup>, il quale è assimilabile ad una malta a presa rapida priva di inerti<sup>17</sup>. A oggi, si tratta dell'applicazione più diffusa nello stato dell'arte in materia, in quanto non esistono ancora tecnologie affidabili per produrre elementi di armatura in simultanea all'implementazione dei

architectural elements (De Kestelier and Buswell, 2009). The systems analysed include contour crafting (Khoshnevis *et.al.*, 2006), powder-bed deposition (Morgante, 2011), and robotic extrusion of cement-like materials, or concrete printing (De Kestelier, 2011). By examining technological advancements in manufacturing, the paper describes additive processes as a connection between the digital and physical, allowing architects and designers to expand their design capabilities through unprecedented geometric freedom (De Kestelier and Buswell, 2009).

Since the 2010s, new modes have emerged, such as Wasp Delta technology, Apis Cor's mechanical manipulators, and drones programmed to deposit cement polymers (Naboni and Paoletti, 2015; Craveiroa *et.al.*, 2019). However, six or seven-axis robotic

extrusion has the advantage of being implementable with standard setups and allowing for flexible customisation of the workspace due to industrial robots' versatility. Recent experiments have involved the use of materials such as raw earth, cellulose-based biopolymers, hydrogels, and multi-material combinations (Mostafavi *et.al.*, 2019). Despite this progress, the construction industry is currently limited to using mortars and cement mixtures, as they are more widely available and easily certifiable (see DFab House or projects by Besix3D, Vertico, XtreeE, and TwenteAM).

The technical setup of Citizen Robotics (Fig. 1) has been defined based on established systems, to fit into a context conducive to information exchange and dissemination of transferable knowledge to the local community. The fab-lab owns a seven-axis ABB



*layer* di stampa<sup>18</sup>. Il flusso di lavoro per la stampa 3D cementizia si impone a partire dalla progettazione digitale basata sulla manipolazione algoritmica scritta in linguaggio Python che traduce le informazioni geometriche in percorso macchina, o *toolpath*. La conversione dei pixel in voxel avviene profilando le poli-superficie di progetto in *layer* orizzontali a loro volta scomposti in punti target. La stabilità della stampa è data dalla corretta negoziazione di parametri quali spessore degli strati, posa di rinforzi metallici *intra-layer*, velocità di estrusione e tempi di presa del materiale.

### Fasi della ricerca: fabbricazione digitale e progettazione architettonica

workflow computazionali le cui decisioni informate in fase progettuale confluiscono nella programmazione e implementazione robotica. Tale processo è facilitato dall'accesso, da parte dell'università, a robot di seconda mano dismessi dalle catene di montaggio del settore automobilistico di Detroit. Questo trasferimento tecnologico *manufacturing-design* è supportato dalla prospettiva che il futuro delle costruzioni includa la robotica, attraverso realizzazioni materiche additive, sottrattive o combinate.

Nel semestre estivo 2022, si è voluto testare in modo incrementale il passaggio di scala dalla fabbricazione di plastici di studio alla produzione additiva alla scala architettonica utilizzando la tecnologia di Citizen Robotics. Il lavoro si è concretizzato con la progettazione e realizzazione, nel contesto del laboratorio

### *Critical Practice: un primo studio di fattibilità*

Il College of Architecture and Design offre, nel *core curriculum*, l'apprendimento di

Critical Practice<sup>19</sup>, di un'installazione *free-form* stampata in 3D (Fig. 2). Un gruppo composto da sessanta studenti si è occupato dell'elaborazione della proposta creativa, implementazione tecnologica *off-site*, traslazione CAD/CAM, pianificazione delle tempistiche di stampa 3D, trasporto *on-site* ed installazione dei componenti. L'esito formale ha tenuto conto delle potenzialità della tecnologia stessa, programmata per realizzare oggetti in forme libere senza l'uso di casseforme. La geometria dell'installazione è stata suddivisa in sezioni che, una volta assemblate, sono state connesse senza soluzione di continuità al suolo circostante, ad enfatizzare la natura organica del design (Fig. 3). Durante il semestre, gli studenti hanno perseguito una strategia *fabrication-aware*, attraverso la quale è stato possibile stabilire una nuova correlazione tra le variabili: tempo / efficacia costruttiva / costo delle modifiche progettuali in opera, rappresentate nel grafico di MacLeamy<sup>20</sup> (Fig. 4). Poiché gli strumenti per la fabbricazione digitale permettono di tradurre quasi istantaneamente le intenzioni formali in realizzazioni materiche (Gramazio and Kohler, 2008), ciascun componente di progetto è stato predisposto per l'esecuzione robotica in fase progettuale,

industrial robot installed on a mobile platform. The robot is equipped with an extruder for additive manufacturing, which is connected to the material loading mechanism. The material is a rapid-setting mortar without any aggregates. Currently, this is the most commonly used application in the field, as there are still no reliable technologies to produce reinforcement elements while implementing the print layers. The workflow for 3D cement printing starts with digital design, which is created using algorithmic manipulation written in Python language that translates geometric information into a machine path, or *toolpath*. The conversion of pixels into voxels happens by profiling the design's poly-surfaces into horizontal layers and dividing them into target points. The stability of the print is achieved by properly adjusting parameters such

as layer thickness, placement of *intra-layer* metal reinforcements, extrusion speed, and material setting times.

### Phases of the research: architectural design and digital fabrication

*Critical Practice: a first feasibility study*  
 The College of Architecture and Design introduces computational workflows, robotic programming, and digital fabrication in its core undergraduate curriculum. This process is facilitated by the university's access to second-hand robots decommissioned from Detroit's automotive assembly lines. The resulting manufacturing-design technology transfer is supported by the expectation that the future of construction will include robotics through additive, subtractive, or combined material implementations.

During the summer of 2022, a robot-

ically-informed production strategy was implemented to incrementally test the scale shift from small prototypes to large-scale 3D printing using Citizen Robotics technology. The project was carried out in the Critical Practice design studio and resulted in a free-form 3D printed installation (Fig. 2). Sixty graduate students participated in the creation of the design, off-site technological implementation, CAD/CAM translation, 3D printing timing, transportation of the prototypes, and on-site installation. The design took advantage of the technology's ability to produce free-form objects without the use of moulds or construction frameworks. The installation was split into sections that connected seamlessly to the ground, showcasing the organic design (Fig. 3).

Throughout the semester, students pursued a fabrication-aware approach,

forming a new correlation between the variables: time / construction effectiveness / cost of design changes, as depicted in the MacLeamy graph (Fig. 4). With digital fabrication tools allowing a quick translation of design into material reality (Gramazio and Kohler, 2008), each design element was prepped for robotic execution during the design phase, forming a continuum between design and construction (Kolarevic, 2003; Leach *et al.*, 2004), and resulting in improved final quality.

### *House in Grosse Pointe Woods: refining technological abilities*

The Critical Practice project has initiated a phase of experiments aimed at designing a residential project for a private client in Grosse Pointe Woods, Michigan. Part of the envelope will be 3D printed (Fig. 5). The design proposal (Fig. 6 and Fig. 7) was developed

02 | Installazione in forme libere stampata in 3D realizzata nel contesto del laboratorio di progetto Critical Practice, coordinato dai docenti Karl Daubmann, Azubike Ononye e Fernando Bales. Le fasi progettuali si sono sviluppate nel corso del semestre, mentre installazione e assemblaggio sono state compresse nella settimana finale. Foto di Steve Kroodsma

*A freeform, robotically 3D printed prototype created during the Critical Practice design studio led by instructors Karl Daubmann, Azubike Ononye, and Fernando Bales. The design phases took place over the semester, with installation and assembly being completed during the final week. Photo by Steve Kroodsma*

03 | Dettaglio dell'installazione progettata e installata dagli studenti nel campus della Lawrence Technological University, College of Architecture and Design. Foto di Steve Kroodsma

*Detail of the installation designed and installed by students at Lawrence Technological University's College of Architecture and Design. Photo by Steve Kroodsma*

stabilendo un *continuum* tra design e costruzione (Kolarevic, 2003; Leach *et.al.*, 2004) a beneficio della qualità finale.

#### *Casa a Grosse Pointe Woods: affinamento delle capacità tecnologiche*

Il progetto Critical Practice ha dato avvio ad una fase di sperimentazioni finalizzate alla realizzazione di un progetto residenziale per un cliente privato a Grosse Pointe Woods, Michigan, di cui parte dell'involucro verrà stampato in 3D (Fig. 5). La proposta progettuale (Figg. 6, 7) è stata elaborata dall'autore del contributo in collaborazione con lo studio Daub – *design, architecture, urbanism, building*.

La materializzazione dell'edificio dovrà tenere conto di fattori e limitazioni dati dal contesto normativo – tema rilevante anche in Italia e nel quadro europeo – che si vuole contribuire ad aggiornare tramite la presentazione di un precedente progettuale. Il regolamento edilizio di Detroit, infatti, non menziona la stampa 3D come possibile procedura costruttiva da impiegare né in opera né per la fabbricazione di unità edilizie fuori opera. Questa premessa comporta diversi scenari a partire dall'impossibilità di allestire una struttura per la produzione di componenti costruttivi direttamente in cantiere e quindi stampare l'involucro come unico componente monolitico. Inoltre, non vi sono linee guida<sup>21</sup> che definiscano le caratteristiche strutturali di sistemi costruttivi realizzati tramite estrusione robotica ce-

by the author of the paper in collaboration with the architecture firm Daub - design, architecture, urbanism, building.

The materialisation of the building must consider factors and limitations established by the regulatory context - a significant issue also in Italy and the European framework. This design effort is intended to help update such regulations by establishing a building precedent. The Detroit building code does not mention 3D printing as a possible construction method on-site or for off-site building unit production. This leads to several challenges, including the inability to set up a temporary production facility for building components on site and, therefore, printing the envelope as a single piece. There are also no guidelines that summarise the structural characteristics of construction systems made with robotic

cement extrusion (American Concrete Institute, 2014). To overcome this, the print layout and the shape of individual wall segments were developed taking into account hollow vertical slots in which to cast reinforced concrete once the rigid thermal insulation panels are installed inside the stratigraphy. By regulation, the 3D printed envelope is considered formwork, which does not impact structural performance or thermal behaviour calculations. The systematisation of the described design factors has established the current state of research progress. Currently, wall prototypes (Fig. 8) are being produced through printing sessions and full-scale design iterations, leading to a pilot typology for constructing economically sustainable buildings or construction units. Eliminating labour-intensive procedures, such as formwork installation, could

reduce the cost of a reinforced concrete building structure by 40-60% (Aghaei *et al.*, 2021).

To validate form-finding, a sequence of structural tests on the envelope is being carried out with the assistance of the College of Engineering at Lawrence Technological University. The baseline prototype processed by Citizen Robotics will undergo compression and bending strength tests. Afterward, the adhesion and tensile strength of the printed layers will be evaluated to assess airtightness and the need for metal joints between layers. Furthermore, the continental climate in Michigan suggests exposing the 3D printed material to freezing and thawing cycles using the environmental chamber at the College of Engineering. Upon completion of the data collection, the architecture firm Daub will compile the information into an

executable document that will initiate the building construction phases by the summer of 2023.

#### **Limitations and potential: discussion of experimental results**

Regulatory restrictions have informed design decisions and, more specifically, the processes of fabrication, transportation, and assembly of construction components. In response, ongoing experiments are dictating a feasibility study agenda to advance the state-of-the-art knowledge and improve the performance-based workflows involved, particularly for components like the building envelope. While the technological infrastructure for large-scale 3D printing has yet to be fully developed, research has already shown that digital fabrication brings environmental, energy, and resource benefits (Bock and Linner, 2015). De-



04 | La curva di MacLeamy, di Patrick MacLeamy dimostra come la fase iniziale della progettazione abbia una forte influenza sul risultato, con un basso impatto sui costi. La presente ricerca (elaborazione del grafico in arancione), sostiene che, poiché gli strumenti di fabbricazione digitale permettono di traslare istantaneamente design e making, sia possibile estendere maggiormente la durata del processo progettuale ai fini di una migliore qualità del risultato. Immagine dell'autore

The MacLeamy Curve by Patrick MacLeamy shows that early design decisions have a significant impact on outcomes with low effects on cost. The present research (represented by the orange overlays on the graph) argues that digital fabrication tools facilitate design-to-making translation, leading to longer design processes and higher quality outcomes. Image by the author

mentizia (American Concrete Institute, 2014). Per questo motivo, il layout di stampa e la forma dei singoli segmenti murari sono stati elaborati tenendo conto di alloggiamenti nei quali gettare il calcestruzzo armato una volta posati i pannelli rigidi di isolamento termico all'interno della stratigrafia. Il sistema descritto caratterizza l'involucro stampato in 3D come una cassaforma che, da normativa, non collabora ai fini del calcolo della performance strutturale né del comportamento termico. La messa a sistema dei fattori di progetto sopra descritti ha definito lo stato attuale di avanzamento della ricerca. Sono infatti in corso di svolgimento sessioni di stampa ed iterazioni progettuali in scala reale per produrre prototipi murari (Fig. 8) che confluiscano in una tipologia pilota per la realizzazione di edifici, o porzioni di edificio, economicamente sostenibili. La rimozione di procedure *labor-intensive* come l'installazione delle casseforme, ad esempio, permetterebbe di abbattere dal 40 al 60% del costo di una struttura edilizia in calcestruzzo armato (Aghaei *et al.*, 2021). Per validare il *form-finding*, si è deciso di definire una sequenza ragionata di test strutturali<sup>22</sup> sull'involucro con il coinvolgimento del College of Engineering della Lawrence Technological University. Sulla base della configurazione geometrica del prototipo *baseline* processato roboticamente da Citizen Robotics, verranno testate in primo luogo resistenza a compressione e flessione. Conseguentemente, si potrà avviare l'analisi di aderenza e resistenza a tensione dei layer di stampa per valutarne tenuta all'aria ed eventuale necessità di inserire giunzioni metalliche tra gli strati. A corollario, il clima continentale del Michigan suggerisce l'utilità sperimentale di sottoporre il materiale stampato in 3D a cicli di congelamento e scongelamento

spite the limitations in creating load-bearing structural elements or a protocol for ensuring safety in automated construction sites, some of these benefits consist of the capability of enhancing construction practices that generate material waste, streamlining the design supply chain (Pizzi, 2013), and potentially incorporating the structural role of 3D printed components in the architectural system. An untapped potential is the possibility to create on-site prefabrication units with robots mounted on mobile platforms. Since buildings are multi-material entities, the future of the building industry could feature widespread construction sites where industrial robots can be programmed in real-time or remotely to perform manufacturing and assembly tasks of complex systems. In this scenario, a model of distributed practice (Slocum *et al.*, 2020) can assist in

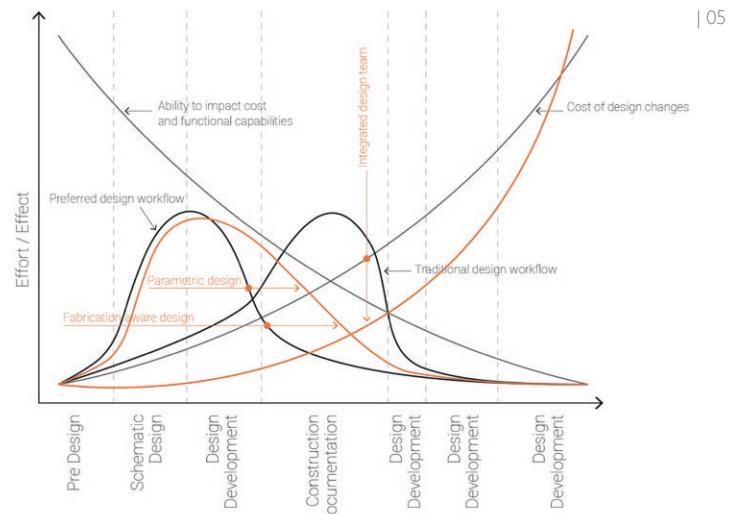
developing fabrication workflows that prioritise project variability and minimise repetition in robotic execution.

### Conclusions

The role of additive, subtractive, and combined fabrication tools is to establish new design languages based on the use of digital data as a tool for knowledge in the discipline (Claypool *et al.*, 2019; Lorenzo-Eiroa *et al.*, 2013). The research process described has validated the necessary phases for enabling competencies to translate digital projects into physical realities. The presence of a fab-lab in an area dominated by mass production also serves as a catalyst for creating a new cultural context in which the use of automation enhances the creative process in architecture.

Architects currently provide builders and makers with operational

05 | Proposta progettuale per una residenza a Grosse Pointe Woods, Michigan, per cui parte dell'involucro verrà stampato in 3D con materiale cementizio. Immagine dell'autore  
Design proposal for a private home in Grosse Pointe Woods, Michigan. Part of the envelope will be 3D printed with cementitious material. Image by the author



information using instructions and notations (Carpo, 2017) conveyed through the rules of graphic representation. In the future, the application of robotic knowledge to the construction industry may blur the distinction between design and construction (Melendez *et al.*, 2020). This approach raises questions about the need for producing two-dimensional drawings and construction details for the approval of building permits, as digital robotic fabrication processes are defined by abstract computational models that can be exported as machine codes. These codes are sequences of programmed spatial coordinates that execute specific tasks. In this scenario, advanced implementation tools like robots expand the workspace of designers and architects, allowing them to express craftspeople's implementation methods within the context of

the Fourth Industrial Revolution. The outcomes of this research will serve as the foundation for an infrastructure that promotes the culture of automation in architecture through educational programmes, where human-machine hybrids drive customisation of design processes and procedural freedom.

### ACKNOWLEDGMENTS

The research stems from a collaboration between Lawrence Technological University's College of Architecture and Design, the architecture firm Daub (design, architecture, urbanism, building) directed by Karl Daubmann, and the start-up Citizen Robotics. The graphics were created by Anjelo Hana, who contributed to the work in the role of Research Assistant.

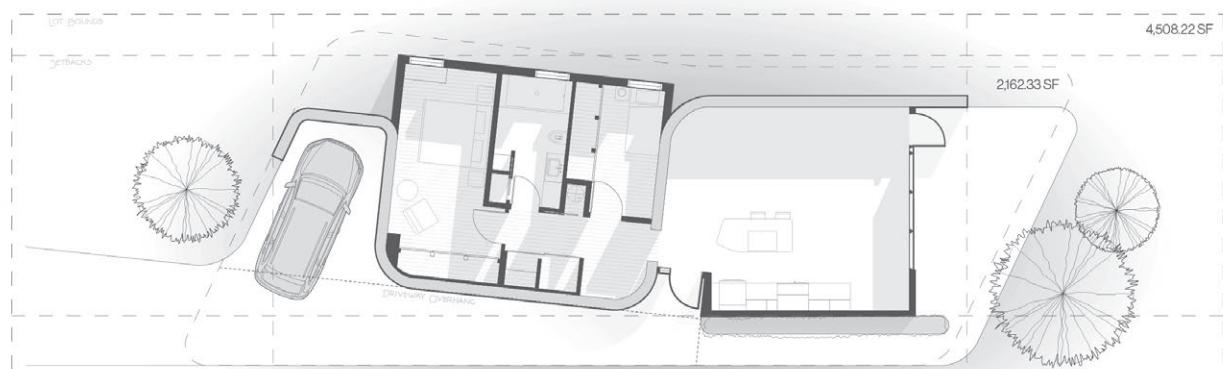
utilizzando la camera ambientale a disposizione del College of Engineering. Lo studio Daub avrà il compito, a conclusione della raccolta dati sopra descritta, di far confluire le informazioni in un documento esecutivo che avvierà le fasi costruttive dell'edificio entro l'estate del 2023.

### Discussione dei risultati sperimentali tra limiti e potenzialità

Le limitazioni normative hanno indirizzato le scelte progettuali e, in misura più concreta, i processi previsti di fabbricazione, trasporto e assemblaggio dei componenti costruttivi. In risposta, le sperimentazioni in corso dettano un'agenda di studi di fattibilità per avanzare lo stato dell'arte della conoscenza ed ottimizzare i flussi di lavoro *performance-based* coinvolti, in particolar modo per componenti come l'involucro edilizio. Nonostante l'infrastruttura tecnologica per la stampa 3D alla scala architettonica non sia del tutto risolta – non vi è ancora la capacità tecnica di realizzare orizzontamenti portanti o un protocollo metodologico per gestire la sicurezza nel cantiere automatizzato

– studi scientifici hanno già evidenziato come la fabbricazione digitale apporti benefici relativi ad impatto ambientale, consumo energivoro ed utilizzo di risorse (Bock and Linner, 2015). Parte di questa ottimizzazione deriva da fattori quali l'upgrade delle routine costruttive che generano spreco di materiale, la riduzione della filiera progettuale (Pizzi, 2013) e, possibilmente, l'accettazione del contributo strutturale delle formulazioni stampate in 3D.

Un potenziale inesplorato riguarda, a esempio, la possibilità di allestire unità di prefabbricazione in opera con robot installati su piattaforme mobili. Poiché gli edifici sono situazioni multi-materiale, si può ambire ad un futuro delle costruzioni caratterizzato da unità di cantiere diffuse in cui bracci meccanici industriali vengono programmati in tempo reale o in remoto per svolgere compiti differenziati di manifattura e assemblaggio di sistemi complessi. In questo scenario, un modello di *distributed practice* (Slocum *et.al.*, 2020) può contribuire alla definizione di workflow di fabbricazione volti a mantenere la variabilità del progetto come fattore centrale e, al contempo, minimizzare le ripetizioni nell'esecuzione robotica.



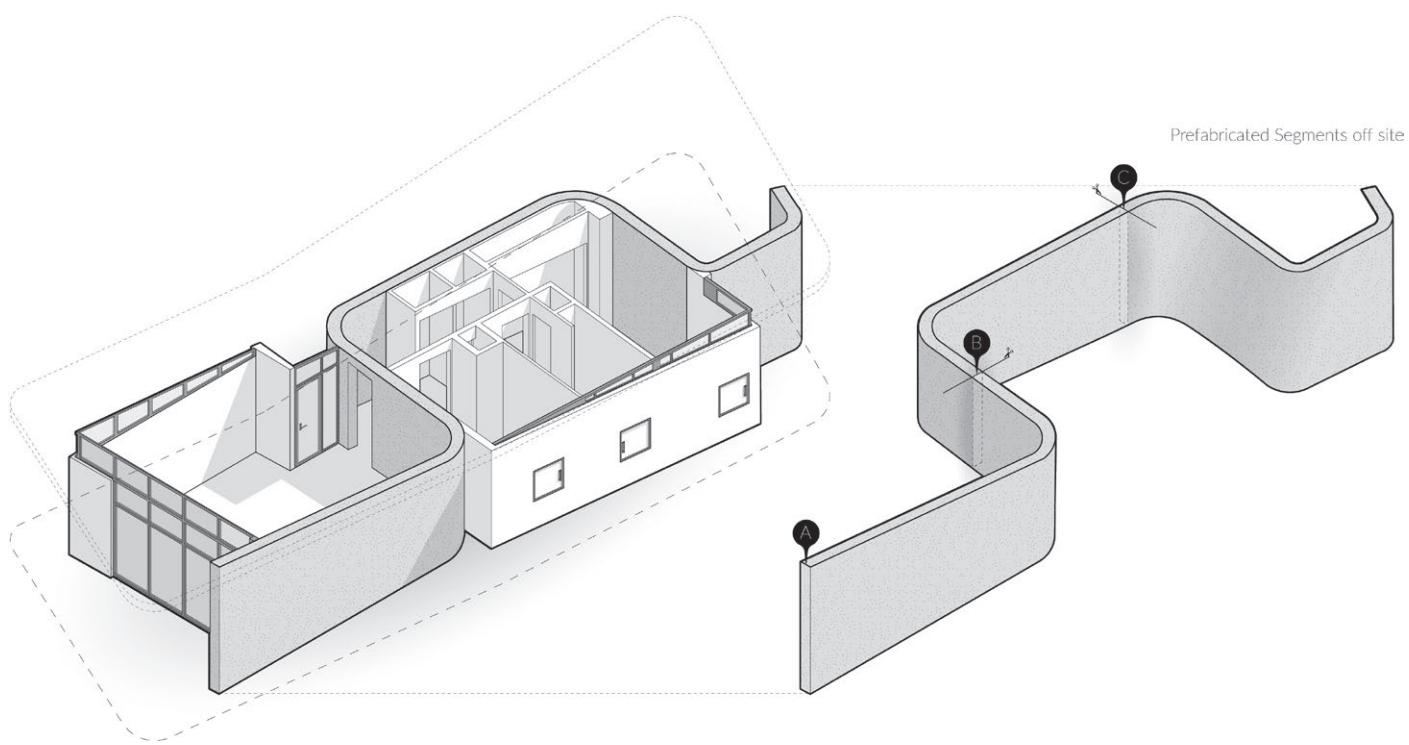
07 | Vista assonometrica, residenza a Grosse Pointe Woods. Immagine dell'autore

Axonometric view of Grosse Pointe Woods' house. Image by the author

08 | Prototipi di involucro architettonico stampati in 3D da Citizen Robotics

Architectural envelope prototypes 3D printed by Citizen Robotics. Photos by the author

07 |



### Annotazioni conclusive

Gli strumenti per la fabbricazione additiva, sottrattiva, combinata hanno il ruolo di definire linguaggi progettuali inediti basati sull'uso dei dati digitali come strumento conoscitivo della disciplina (Claypool *et.al.*, 2019, Lorenzo-Eiroa *et.al.*, 2013). In tal senso, il processo di ricerca descritto è stato utile per validare le sequenzialità necessarie per abilitare competen-

ze coinvolte nella traslazione di progetti digitali in materializzazioni fisiche. Inoltre, l'attività di un fab-lab in un'area fortemente caratterizzata dalla fabbricazione in serie si inserisce come leva per definire un nuovo contesto culturale, all'interno del quale vi è una traslazione di significato tra produzione di massa ed utilizzo dell'automazione per affermare il processo creativo in architettura.

### NOTES

<sup>1</sup> Size of the Global Construction Market from 2020 to 2021, with Forecasts from 2022 to 2030. See: <https://www.statista.com/statistics/1290105/global-construction-market-size-with-forecasts/> (Online 27/11/2022).

<sup>2</sup> Automation, Robotics, and the Factory of the Future. See: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/automation-robotics-and-the-factory-of-the-future> (Online 27/11/2022).

<sup>3</sup> Industrial Robot Cost Declines. See: <https://ark-invest.com/articles/analyst-research/industrial-robot-cost-declines/> (Online 27/11/2022).

<sup>4</sup> euRobotics - European Robotics. See: <https://eu-robotics.net/> (Online 01/09/2022).

<sup>5</sup> The 17 UN Sustainable Goals. See: <https://sdgs.un.org/goals/> (Online 01/09/2022).

<sup>6</sup> Brookings Analysis: "Where the Robots Are." See: <https://www.brookings.edu/blog/the-avenue/2017/08/14/where-the-robots-are/> (Online 01/08/2022).

<sup>7</sup> International Federation of Robotics Report. See: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-density-nearly-doubled-globally> (Online 01/09/2022).

<sup>8</sup> Citizen Robotics is a start-up founded in 2020 in Detroit, Michigan. See: <https://www.citizenrobotics.org/> (Online 01/07/2022).

<sup>9</sup> ACADIA. See: <http://acadia.org/> (Online 01/09/2022).

<sup>10</sup> Wasp technology. See: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> (Online 01/12/2022).

<sup>11</sup> Apis Cor technology. See: <https://apis-cor.com/> (Online 01/11/2022).

<sup>12</sup> Aerial Additive Manufacturing with Multiple Autonomous Robots. See: <https://www.nature.com/article/>



Oggi, gli architetti producono informazioni operative per i costruttori/makers tramite istruzioni, o notazioni (Carpo, 2017), espresse attraverso le regole della rappresentazione grafica. In futuro, la conoscenza robotica applicata al settore delle costruzioni può configurarsi come il superamento della demarcazione netta tra progetto e costruzione (Melendez *et.al.*, 2020). Tale approccio porta a dibattere se sia ancora opportuno produrre disegni e dettagli esecutivi per l'approvazione di documenti come i permessi di costruire, in quanto i flussi di lavoro finalizzati alla fabbricazione digitale robotica sono definiti da modelli computazionali astratti esportabili come codici macchina, ovvero sequenze di coordinate spaziali programmate per compiere determinate *tasks*. In questo scenario, strumenti di implementazione avanzata come i robot rappresentano l'estensione materiale dello spazio di lavoro di progettisti e designer, i quali possono operare come espressione dell'artigianato digitale nel quadro della Quarta Rivoluzione Industriale. I risultati avanzati della ricerca costituiranno la base per la creazione di un'infrastruttura per la diffusione della cultura dell'automazione alla scala architettonica attraverso programmi educativi per i quali le ibridazioni uomo-macchina saranno una forza trainante nel perseguire personalizzazione dei processi progettuali e libertà procedurale.

#### RINGRAZIAMENTI

La ricerca risulta da una collaborazione tra il College of Architecture and Design della Lawrence Technological University, lo studio Daub (design, architecture, urbanism, building), diretto da Karl Daubmann, e la start-up Citizen Robotics. Le elaborazioni grafiche sono di Anjelo Hana, che ha contribuito al lavoro nel ruolo di Research Assistant.

#### NOTE

<sup>1</sup> Size of the Global Construction Market from 2020 to 2021, with Forecasts from 2022 to 2030. Si veda: <https://www.statista.com/statistics/1290105/global-construction-market-size-with-forecasts/> (Online 27/11/2022).

<sup>2</sup> Automation, Robotics, and the Factory of the Future. Si veda: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/automation-robotics-and-the-factory-of-the-future> (Online 27/11/2022).

<sup>3</sup> Industrial Robot Cost Declines. Si veda: <https://ark-invest.com/articles/analyst-research/industrial-robot-cost-declines/> (Online 27/11/2022).

<sup>4</sup> euRobotics - European Robotics. Si veda: <https://eu-robotics.net/> (Online 01/09/2022).

<sup>5</sup> The 17 UN Sustainable Goals. Si veda: <https://sdgs.un.org/goals/> (Online 01/09/2022).

<sup>6</sup> Brookings Analysis: "Where the Robots Are." Si veda: <https://www.brookings.edu/blog/the-avenue/2017/08/14/where-the-robots-are/> (Online 01/08/2022).

<sup>7</sup> International Federation of Robotics Report. Si veda: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-density-nearly-doubled-globally> (Online 01/09/2022).

<sup>8</sup> Citizen Robotics è una start-up fondata nel 2020 con sede a Detroit, Michigan. Si veda: <https://www.citizenrobotics.org/> (Online 01/07/2022).

<sup>9</sup> ACADIA. Si veda: <http://acadia.org/> (Online 01/09/2022).

<sup>10</sup> Tecnologia Wasp. Si veda: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> (Online 01/12/2022).

<sup>11</sup> Tecnologia Apis Cor. Si veda: <https://apis-cor.com/> (Online 01/11/2022).

<sup>12</sup> Aerial Additive Manufacturing with Multiple Autonomous Robots. Si veda: <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04988-4> (Online 01/09/2022).

<sup>13</sup> 3D Printing Strategies Towards the Realization of Load-bearing Earthen Structure. Si veda: <https://iaac.net/iaac-wasp-new-3d-printing-strategies-towards-realisation-load-bearing-earthen-structures/> (Online 01/12/2022).

<sup>14</sup> Eco-Metabolic Architecture. See: <https://royaldanishacademy.com/case/eco-metabolic-architecture> (Online 01/12/2022).

<sup>15</sup> Aesthetically Repurposing Architectural Elements with Nanocellulose Hydrogels. See: [https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2022/06/Rudin\\_Rebecka\\_MTBooklet\\_2022\\_43.5MB.pdf](https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2022/06/Rudin_Rebecka_MTBooklet_2022_43.5MB.pdf) (Online 01/12/2022).

<sup>16</sup> TwenteAM technology. See: <https://www.twente-am.com/> (Online 01/09/2022).

<sup>17</sup> Branch Technology. See: <https://branchtechnology.com/> (Online 01/09/2022).

<sup>18</sup> Critical Practice Studio. See: [https://www.ltu.edu/architecture\\_and\\_design/critical-practice.asp](https://www.ltu.edu/architecture_and_design/critical-practice.asp) (Online 01/09/2022).

<sup>19</sup> The MacLeamy Curve. See: <https://www.danielldavis.com/macleamy/> (Online 01/09/2022).

<sup>20</sup> See the standards ASTM C109, ASTM C1583, and ASTM F42.07.07. By 2022, ASTM International has proposed to write a draft standard (ASTM WK77614) entitled: "New Specification for Additive Manufacturing for Construction - Qualification Principles - Structural and infrastructure elements": <https://www.astm.org/workitem-wk77614> (Online 01/09/2022).

<sup>21</sup> See the guidelines: <https://www.ul.com/news/build-trust-3d-manufactured-buildings-ul-3401> and <https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac509/> (Online 01/09/2022).

<sup>14</sup> Eco-Metabolic Architecture. Si veda: <https://royaldanishacademy.com/case/eco-metabolic-architecture> (Online 01/12/2022).

<sup>15</sup> Aesthetically Repurposing Architectural Elements with Nanocellulose Hydrogels. Si veda:

[https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2022/06/Rudin\\_Rebecka\\_MTBooklet\\_2022\\_43.5MB.pdf](https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2022/06/Rudin_Rebecka_MTBooklet_2022_43.5MB.pdf) (Online 01/12/2022).

<sup>16</sup> Tecnologia TwenteAM. Si veda: <https://www.twente-am.com/> (Online 01/09/2022).

<sup>17</sup> Laticrete. Si veda: <https://laticrete.com/en/solution-center/featured-solutions/3d-printing> (Online 01/09/2022).

<sup>18</sup> Branch Technology. Si veda: <https://branchtechnology.com/> (Online 01/09/2022).

<sup>19</sup> Critical Practice Studio. Si veda: [https://www.ltu.edu/architecture\\_and\\_design/critical-practice.asp](https://www.ltu.edu/architecture_and_design/critical-practice.asp) (Online 01/09/2022).

<sup>20</sup> The MacLeamy Curve. Si veda: <https://www.danieldavis.com/macleamy/> (Online 01/09/2022).

<sup>21</sup> Si vedano i riferimenti agli standard ASTM C109, ASTM C1583, e ASTM F42.07.07. Entro il 2022, ASTM International si è proposta di redarre una bozza normativa (ASTM WK77614) intitolata "New Specification for Additive Manufacturing for Construction – Qualification Principles – Structural and infrastructure elements": <https://www.astm.org/workitem-wk77614> (Online 01/09/2022).

<sup>22</sup> Si vedano le linee guida: <https://www.ul.com/news/build-trust-3d-manufactured-buildings-ul-3401> e <https://icc-es.org/acceptance-criteria/ac509/> (Online 01/09/2022).

De Kestelier, X., and Buswell, R. (2009), "A digital design environment for large-scale rapid manufacturing", *Proceedings of the 29<sup>th</sup> Annual Conference of ACADIA - Building a Better Tomorrow*, Chicago, IL, October 22-25, 2009, pp. 201-208.

Fingrut, A., and Lau, D. (2022), "Construction Automation and Design Research", *Technology|Architecture+ Design*, Vol. 6(2), pp.159-161.

Gramazio, F., and Kohler, M., (2008), *Digital Materiality in Architecture*, Lars Muller Publisher, Zurich.

Guenat, S., Purnell, P., Davies, Z. G., Nawrath, M., Stringer, L. C., Babu, G. R., et.al (2022). "Meeting sustainable development goals via robotics and autonomous systems", *Nature communications*, 13(1), pp. 1-10.

Keramas, J. G. (1998), *Robot Technology Fundamentals*, Delmar Learning, New York.

Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K. T., and Yeh, Z. (2006), "Mega-scale fabrication by contour crafting", *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 1(3), pp. 301-320.

Kolarevic, B., 2003, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New York and London: Spon Press - Taylor & Francis Group.

Leach, N., Turnbull, D., and Williams, C. J. (2004), *Digital Tectonics*, Academy Press, Cambridge.

Lorenzo-Eiroa, P., and Sprecher, A. (2013), *Architecture in Formation: On the Nature of Information in Digital Architecture*, Routledge, New York.

Naboni, R., and Paoletti, I. (2015), *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Cham, Springer International Publishing.

Oesterreich, T. D., and Teuteberg, F. (2016), "Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry", *Computers in industry*, Vol. 83, pp. 121-139.

Melendez, F., Diniz, N., and Del Signore, M. (Eds.). (2020), *Data, Matter, Design: Strategies in Computational Design*, Routledge, New York.

Mostafavi, S., Kemper, B. N., and Du, C. (2019), Materializing Hybridity in Architecture: Design to Robotic Production of Multi-materiality in Multiple Scales, *Architectural Science Review*, 62(5), pp. 424-437.

Picon, A. (2022), "Digital Technology and Architecture: Towards a Symmetrical Approach", *Technology|Architecture+ Design*, 6(1), pp. 10-14.

Pizzi, E. (2013), "Verso la riduzione della filiera progettuale per ottimizzare i processi produttivi ai fini della innovazione e della competitività/Toward the simplification of the design process chain aimed at optimizing the productive processes to improve innovation and competitiveness", *Techne*, 6, pp. 55-62.

Pottmann, H. (2013), "Architectural geometry and fabrication-aware design", *Nexus Network Journal*, 15(2), pp. 195-208.

Schwab, K. (2017), *The Fourth Industrial Revolution*, Currency, New York.

Vial, G. (2021), "Understanding digital transformation: A review and a research agenda", *Managing Digital Transformation*, pp. 13-66.

Slocum, B., Ago, V., Doyle, S., Marcus, A., Yablonina, M., and del Campo, M. (Eds.) (2020), *Distributed Proximities, Proceedings of the 40th Annual Conference of ACADIA - Distributed Proximities*, Online + Global, October 24-30, 2020.

## REFERENCES

Aghaei Meibodi, M., Craney, R., and McGee, W. (2021), "Robotic Pellet Extrusion: 3D Printing and Integral Computational Design", *Proceedings of the 41st Annual Conference of ACADIA - Toward Critical Computation*, Online + Global, November 3-6, 2021, pp. 410-419.

American Concrete Institute (2014), *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 18-14)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Bock, T., and Linner, T. (2015), *Robot-oriented Design*. Cambridge University Press, Cambridge.

Carpo, M. (2017), *The Second Digital Turn: Design Beyond Intelligence*, MIT Press, Cambridge.

Claypool, M., Jimenez Garcia, M., Retsin, G., and Soler, V. (2019), *Robotic Building: Architecture in the Age of Automation*. De Gruyter, Berlin.

Craveiroa, F., Duartec, J. P., Bartoloa, H., and Bartolod, P. J. (2019), "Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0", *Automation in Construction*, Vol. 103 7/19, pp. 251-267.

Daugherty, P. R., and Wilson, H. J. (2018), *Human+Machine: Reimagining Work in the Age of AI*. Harvard Business Press, Cambridge.

De Kestelier, X. (2011), "Design potential for large-scale additive fabrication. Free-form construction", in Glynn, S. and Sheil, B. (Eds.), *Fabricate: Making Digital Architecture*, UCL Press, pp. 244-249.

Matteo Giovanardi<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-8037-3381>  
Thaleia Konstantinou<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7085-312X>  
Riccardo Pollo<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-6933-6368>  
Tillmann Klein<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-7883-1953>

<sup>1</sup> Politecnico di Torino, Dipartimento di Architettura e Design, Torino, Italia

<sup>2</sup> Department of Architectural Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands

<sup>3</sup> Politecnico di Torino, Dipartimento Interateneo di Scienza, Progetto e Politiche del Territorio, Torino, Italia

matteo.giovanardi@polito.it  
t.konstantinou@tudelft.nl  
riccardo.pollo@polito.it  
t.klein@tudelft.nl

**Abstract.** Nel settore delle facciate, la transizione ecologica e circolare impone l'adozione di nuovi modelli di business che sfruttino al massimo il valore della materia. In questo contesto, l'*Internet of Things* (IoT) è identificato quale potenziale driver tecnologico per la diffusione di approcci circolari. Scopo dell'articolo è chiarire il ruolo dell'IoT nell'abilitare cinque modelli di business circolari nel settore delle facciate. Attraverso una matrice che evidenzia la relazione tra potenziali informazioni prodotte dall'IoT e azioni chiave per il raggiungimento dei modelli di business, si evidenziano i benefici di un sistema di facciata IoT-based. La discussione dei risultati apre il dibattito sulle prospettive di componenti edili digitalmente integrati.

**Parole chiave:** Façade; Circular Economy; IoT; Circular Business Model; Product Innovation.

## Introduzione

Negli ultimi anni, l'effetto combinatorio e moltiplicatore di fenomeni di natura diversa ha portato a un rinnovato interesse verso il tema dell'Economia Circolare (EC) nel settore delle facciate. Se, in una prima fase, l'attenzione delle aziende e del mondo della ricerca per l'EC si è rivolta principalmente allo sviluppo di sistemi disassemblabili e all'uso di materiali riciclabili, oggi tale interesse assume una dimensione più ampia. La limitata disponibilità di materie prime e la conseguente dipendenza del mercato da continue fluttuazioni economiche finanziarie impongono lo studio di soluzioni mirate non solo al riuso della materia in termini di volume, ma anche, e soprattutto, al 'riuso' del suo valore (GXN, 2018). Diversi ricercatori denunciano come le applicazioni dei principi circolari nel mercato delle costruzioni

siano ancora limitate (Ingemarsdotter *et al.*, 2020; Giorgi *et al.*, 2022) e che un'azione congiunta da parte di tutti gli attori del sistema sia necessaria per una piena comprensione della dimensione culturale riferita al modello circolare. In questo contesto, emerge come le politiche di sviluppo europee, seppur necessarie, non siano sufficienti a trainare il cambiamento verso nuovi modelli capaci di combinare benefici ambientali, crescita economica e benessere sociale. Un rapido e concreto cambio di paradigma richiede, infatti, l'introduzione di un *resource-conscious design* (Kragh and Jakica, 2022), l'adozione di tecnologie innovative (Rejeb *et al.*, 2022), la creazione di un know-how condiviso (Ghisellini, *et al.*, 2018) e lo sviluppo di Circular Business Models (CBMs) (Bressanelli *et al.*, 2018). Questi ultimi, progettati per la creazione di nuovi valori tendono ad alimentare la competitività economica dell'approccio circolare e abilitare mercati autosufficienti e rigenerativi. A fronte delle continue oscillazioni nel costo dell'energia, del gas e delle materie prime (es. alluminio) (UNICMI, 2021), nuovi modelli circolari stanno emergendo anche nel settore delle facciate. Nella prospettiva di una piena transizione circolare, tale condizione trova nell'innovazione tecnica un'azione essenziale e diversificata (Azcarate-Aguerre *et al.*, 2022). In particolare, diversi ricercatori identificano nelle tecnologie di Industria 4.0, come l'*Internet of Things* (IoT), i potenziali fattori abilitanti per guidare la transizione circolare attraverso nuove modalità di uso e consumo introdotte dai dati (Inge-

## The Internet of Things for circular transition in the façade sector

**Abstract.** In the façade sector, the ecological and circular transition requires the adoption of new business models that exploit the value of the material as much as possible. In this context, the Internet of Things (IoT) is identified as a potential innovation driver for the widespread use of circular approaches. The aim of the paper is to clarify the role of IoT in enabling five circular business models in the façade sector. The potential benefits of an IoT-based façade system are highlighted through a matrix underscoring the relationship between information produced and key actions to achieve the innovative business models. The research discussion and findings open the debate on the perspective of digitally integrated building components.

**Keywords:** Façade; Circular Economy; IoT; Circular Business Model; Product Innovation.

## Introduction

In recent years, the combinatorial and multiplying effect of different phenomena has led to a renewed interest in the topic of Circular Economy (CE) in the façade sector. While in the beginning the focus of business and academia on CE was mainly on the development of disassemblable systems and the use of recyclable materials, today this interest takes on a broader dimension. The limited availability of raw materials and the consequent dependence of the market on continuous financial economic fluctuations impose the study of solutions aimed not only at reusing material in terms of volume, but also, and above all, at the 'reuse' of its value (GXN, 2018). Several researchers report how the applications of circular principles in the construction market are still limited (Ingemarsdotter *et al.*, 2020; Giorgi *et al.*, 2022) and a joint

action by stakeholder is necessary for a full understanding of the cultural dimension referring to the circular model. In this context, it emerges how European development actions and policies (EU, 2020), although necessary, are not sufficient to drive change towards new models capable of combining environmental benefits, economic growth, and social welfare. In fact, a rapid and concrete paradigm shift requires the introduction of resource-conscious design (Kragh and Jakica, 2022), the adoption of innovative technologies (Rejeb *et al.*, 2022), the creation of shared know-how (Ghisellini, *et al.*, 2018), and the development of Circular Business Models (CBMs) (Bressanelli *et al.*, 2018). The latter, designed to create new values, tend to feed the economic competitiveness of the circular approach and enable self-sufficient and regenerative

marsdotter *et al.*, 2020) (Rejeb *et al.*, 2022). A partire da queste premesse, l'articolo chiarisce il ruolo abilitante delle tecnologie IoT per la diffusione di 5 CBM nel settore delle facciate. La relazione tra IoT e CE viene chiarita attraverso lo sviluppo di una matrice che evidenzia la stretta dipendenza tra informazioni e azioni circolari. Attraverso l'individuazione di azioni chiave abilitate dai dati, si pongono le basi per una discussione sui futuri possibili ambiti di innovazione, tecnica e processuale, nel settore delle facciate. In quest'ottica, i connotati della promessa tecnologica contemporanea, identificabile nello sviluppo di sistemi cyber-fisici a supporto di modelli di business innovativi, vengono presentati nella prospettiva di facilitare la transizione ecologica e circolare.

### Cinque modelli di business per la transizione circolare

(Bressanelli *et al.*, 2018; Langley, 2022). Bocken *et al.* (2018), definiscono i CBM come la logica con cui un'organizzazione crea, fornisce e cattura il valore per chiudere e rallentare i cicli dei materiali. Lo sviluppo di nuovi modelli di consumo, o la ridefinizione di modelli esistenti, si basa sulla creazione di valore attraverso una gestione innovativa ed efficiente delle risorse impiegate. Mercati *peer-to-peer* per il noleggio di attrezzature e macchinari edili (es. Edilmag, Dozr, etc.), la trasformazione del riscaldamento domestico in un servizio a noleggio (es. Best Greens), o contratti *performance-oriented* per il sistema di illuminazione (es. Pay per Lux di Philips) rappresentano solamente alcuni esempi di come nuovi CBM stiano emergendo anche nel campo dell'architettura. Diversi sono quindi i modi per ripen-

I CBM sono considerati veicoli di innovazione fondamentali per la transizione circolare

markets. Facing continuous fluctuations in the cost of energy, gas and raw materials (e.g. aluminium) (UNICMI, 2021), new circular models are also emerging in the façade sector.

In the perspective of a circular transition, this condition finds in technical innovation an essential and diversified action (Azzarate-Aguerre *et al.*, 2022). In particular, several researchers identify Industry 4.0 technologies, such as the Internet of Things (IoT), as potential enablers to drive the circular transition through new modes of use and consumption introduced by data (Ingemarsdotter *et al.*, 2020) (Rejeb *et al.*, 2022). Based on these premises, the article clarifies the enabling role of IoT technologies for the deployment of 5 CBMs in the façade sector. The relationship between IoT and CE is highlighted through the development of a matrix that reveals the close

dependence between information and circular actions. The identification of key actions enabled by the IoT lays the groundwork for a discussion of possible future areas of innovation, both technical and procedural, in the façade sector. In this perspective, the features of the contemporary technological promise, identifiable in the development of cyber-physical systems to support innovative business models, are presented in the perspective of facilitating the ecological and circular transition.

#### Five Circular Business Models

CBMs are considered key innovation vehicles for the circular transition (Bressanelli *et al.*, 2018; Langley, 2022). Bocken *et al.* (Bocken *et al.* 2018) define CBMs as the rationale by which an organisation creates, delivers and captures value to close and slow down

sare il rapporto tra consumatore e fornitore di un bene o servizio. Nel libro "Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage", Peter Lacy e Jakob Rutqvist (2015) identificano 5 CBM per illustrare alle imprese i vantaggi dell'approccio circolare. In questo articolo, tali modelli vengono riproposti e analizzati in relazione al settore delle facciate.

*Circular Supply Chain.* In un settore caratterizzato da un numero ingente di attori e dalla produzione di beni durevoli, la costruzione di una filiera corta, efficiente e certificata è un fattore chiave per la transizione circolare. In questo modello, la creazione del valore si basa, oltre che su una filiera capace di reintrodurre i flussi di materia nei processi produttivi, sulla qualità dei processi in atto. In particolare, diversi ricercatori confermano come la tracciabilità di un bene possa risultare determinante nella creazione di una catena del valore (Santana e Ribeiro, 2022). Una maggiore trasparenza sulla qualità del prodotto può determinare, da un lato, una maggiore rispondenza a normative e protocolli ambientali, dall'altro, un'influenza sulla scelta del cliente finale.

*Recovery and recycling.* Poiché le operazioni di recupero, riuso, e riciclo dei componenti edili sono attività centrali nella riduzione del consumo di risorse e produzione rifiuti, è necessario lo sviluppo di nuovi CBM che facilitino la 'chiusura del cerchio' rendendo convenienti da un punto di vista economico tali operazioni. Flussi di materia incostanti e limitati, carenze normative, il basso valore di materiali dismessi risultano ancora fattori deterrenti per la creazione di filiere realmente circolari. Un caso emblematico è rappresentato dal vetro. Sebbene sia un materiale altamente riciclabile, un report di ARUP denuncia

material cycles. The development of new consumption models, or the redefinition of existing models, is based on the creation of value through innovative and efficient management of the resources used. Peer-to-peer markets for construction equipment and plants rentals (e.g. Edilmag, Dozr, etc.), the transformation of domestic heating into a rental service (e.g. Best Greens), or performance-oriented contracts for lighting service (e.g. Pay per Lux by Philips) are just a few examples of how new CBMs are emerging also in the field of architecture. Therefore, there are various ways of rethinking the relationship between consumer and supplier of a good or service. In the book 'Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage', Peter Lacy and Jakob Rutqvist (2015) identify five CBMs to illustrate the advantages of the circular approach to companies. In this paper,

these models are re-proposed and analysed in relation to the façade sector.

*Circular Supply Chain.* In a sector characterised by a large number of players and the production of durable goods, the construction of a short, efficient and certified supply chain is a key factor for the circular transition. In this model, value creation is based not only on a supply chain that can reintroduce material flows into production processes, but also on the quality of the processes in place. In particular, several researchers confirm how the traceability of a good can be decisive in the creation of a value chain (Santana and Ribeiro, 2022). Greater transparency on product quality can, on the one hand, lead to higher compliance with environmental regulations and protocols and, on the other, influence the choice of the end customer.

*Recovery and recycling.* As the recov-

come la quasi totalità del vetro float proveniente dal settore delle costruzioni non venga riciclato in nuovo vetro ma utilizzato come aggregato in sottofondi stradali o materiali isolanti comportando così una sostanziale perdita del valore della materia (ARUP, 2018).

*Extension Service Life.* Nell'ottica di creare valore attraverso l'estensione nel tempo delle condizioni di progetto, aspetti di natura progettuale e gestionale devono essere considerati simultaneamente. I primi fanno riferimento alla progettazione di sistemi facilmente riparabili senza compromettere le funzioni dell'intero sistema (ARUP and Freiner Reifer, 2018), mentre i secondi riguardano lo sviluppo di schemi di gestione post-vendita. Tra questi ultimi, la manutenzione predittiva è considerata una delle strategie più interessanti nella prospettiva circolare. La capacità di anticipare eventuali guasti sulla base delle informazioni raccolte consentirebbe di estendere il valore del sistema nel tempo determinando ingenti risparmi per i gestori e i clienti finali.

*Product As a Service.* La vendita di un prodotto come servizio rappresenta il CBM più adatto a combinare competitività economica e sostenibilità ambientale (Tukker, 2004) (Bocken *et al.*, 2014). L'aspetto innovativo di questo modello è dato dall'estensione delle responsabilità economica e ambientale del produttore. Fornendo un servizio integrato e di lunga durata, il produttore è incentivato a ottimizzarne l'uso, la gestione e la circolarità. Il rapporto contrattuale tra produttore e consumatore può essere così ripensato sulla base di modelli *Pay per Use, leasing, noleggio, o performance-oriented*. In quest'ottica, alcune ricerche europee si stanno muovendo nella direzione del 'Façade As a Service', quale alternativa economica e ambientale al modello di vendita tradizionale (Azcarate-Aguerre *et al.*, 2022).

ery, reuse, and recycling of building components are central activities in the reduction of resource consumption and waste generation, the development of new CBMs that facilitate 'closing the loop' by making such operations economically viable is necessary. Inconsistent and limited material flows, regulatory shortcomings, and the low value of disposed materials are still deterrent factors for the creation of the circular chain. A case in point is glass. Although it is a highly recyclable material, a report by ARUP claims how almost all float glass from the construction sector is not recycled into new glass but used as aggregate in road sub-bases or insulation materials, thus leading to a substantial loss of material value (ARUP, 2018).

*Extension Service Life.* With a view to creating value through the extension of project conditions over time, de-

sign and management aspects must be considered simultaneously. The design issues refer to the design of systems that can be easily repaired without compromising the functions of the entire system (ARUP and Freiner Reifer, 2018), while management ones mainly concern the development of after-sales services. Among the latter, predictive maintenance is considered one of the most interesting strategies in the circular perspective. The ability to anticipate possible failures based on the information gathered could make it possible to extend the value of the system over time, leading to considerable savings for end customers.

*Product As a Service.* Selling a product as a service is the most suitable CBM for combining economic competitiveness and environmental sustainability (Tukker, 2004) (Bocken *et al.*, 2014). The innovative aspect of this model

*Shared Platform.* L'aspetto caratterizzante di questo CBM consiste nella condivisione di prodotti e attività in modo che più persone possibili possano beneficiare della stessa risorsa. Le piattaforme condivise mettono in contatto il proprietario del prodotto con le imprese o i privati che desiderano utilizzarlo. Tali strumenti risultano particolarmente adatti nella promozione di mercati di materiali di seconda mano, nel raccogliere e condividere feedback sulle modalità di uso del bene o nella creazione di database per la conoscenza del patrimonio costruito. In quest'ottica, la creazione di banche dati *open-access* può innescare una maggiore sensibilità sul patrimonio di materia di cui disponiamo.

#### **IoT e dati per la transizione circolare**

Se è vero che 'i dati guidano l'EC', l'IoT può rappresentare un fenomeno abilitante per i nuovi CBM. Definito da Atzori *et al.* (2016) come «a conceptual framework that leverages on the availability of heterogeneous devices and interconnection solutions», l'IoT rappresenta oggi un'opportunità unica per le imprese. La generazione di grandi moli di dati può innescare approcci data-driven per un continuo aggiornamento delle caratteristiche del bene (Bressanelli *et al.*, 2018), supportare il monitoraggio di processi lunghi e complessi, o facilitare la gestione del fine vita (Ingemarsdotter *et al.*, 2020). La capacità di orientare i processi decisionali degli stakeholders grazie alle informazioni raccolte implica l'adozione di una rete diffusa di sensori per la ricezione di dati. Nell'ampio, e ancora poco indagato, panorama delle applicazioni IoT ai componenti edilizi (Pollo *et al.*, 2021), gli autori identificano tre principali famiglie di sensori che potrebbero essere integrati nei componenti di involucro.

is the extension of the producer's economic and environmental responsibilities. By providing an integrated and long-lasting service, the producer is incentivised to optimise its use, management and circularity. The contractual relationship between producer and consumer can thus be rethought on the basis of Pay per Use, leasing, rental, or 'performance oriented' models. In this sense, some European research is moving in the direction of 'Façade As a Service' as an economic and environmental alternative to the traditional sales model (Azcarate-Aguerre *et al.*, 2022).

*Shared Platform.* The defining aspect of this CBM is the sharing of products and activities so that as many people as possible can benefit from the same resource. Shared platforms connect the owner of the product with businesses or individuals who wish to use it. Such

tools are particularly suitable for promoting second-hand material markets, collecting and sharing feedback on usage patterns or creating databases for knowledge of the built heritage and retrofits. In this perspective, the creation of open databases can lead to a greater knowledge of the built heritage in use, thus supporting the theories of Urban Mining.

#### **IoT, Data and Circular Economy**

If it is true that 'data drives CE', the IoT can be an enabling phenomenon for new CBMs. Defined by Atzori *et al.* (Atzori *et al.* 2016) as «a conceptual framework that leverages on the availability of heterogeneous devices and interconnection solutions», today the IoT is a unique opportunity for businesses. In particular, the generation of big data can trigger data-driven approaches for continuous updating of



**Tracking and identification sensors.** Questa famiglia include i dispositivi digitali che abilitano la ‘biografia del prodotto’ e consentono al contempo un rapido accesso alle informazioni. Nello specifico, le tecnologie Radio Frequency Identification (RFID) e Near Field Communication (NFC) rappresentano i dispositivi IoT più comuni per lo scambio di informazioni senza contatto. Composti entrambi da due elementi principali, un tag e un lettore, il primo condivide un segnale quando interrogato dal secondo. In questa prospettiva, diversi ricercatori stanno indagando l’uso di tag RFID per componenti edili prefabbricati in modo da tener traccia della gestione della commessa e dello stato di avanzamento del cantiere da remoto (Chen *et al.*, 2018). Tra gli esempi più significativi, Saint-Gobain ha sviluppato iWin<sup>1</sup>, un tag RFID integrato nel vetrocamera per accedere alle informazioni di prodotto (Fig. 1). Tali tecnologie possono rendere più rapida e sicura la raccolta dati nell’inventario di un bene, monitorarne il posizionamento lungo la filiera, identificarne rapidamente le caratteristiche fisiche e materiche, o darne accesso allo storico delle informazioni una volta in uso. La geolocalizzazione del bene risulta particolarmente efficace nella logistica delle fasi di installazione per cantieri con spazi di lavoro ridotti o con moduli di facciata complessi e differenti tra loro.

**Environmental Monitoring Sensors.** L’opportunità di monitorare attraverso un solo componente i principali parametri ambientali - interni ed esterni - introduce nuove prospettive nella creazione di nuovi valori e servizi. Sensori di temperatura, umidità, pressione, sensori acustici, infrarossi, flussimetri e sensori per la qualità dell’aria possono generare un dataset, e di conseguenza uno storico dei *trend*, da cui trarre informazioni

asset characteristics (Bressanelli *et al.*, 2018), to support the monitoring of long and complex processes, or to facilitate end-of-life management (Ingermarsdotter *et al.*, 2020). The ability to guide stakeholders’ decision-making processes with the information collected implies the adoption of a sensor network to receive data. In the broad, and as yet under-researched, landscape of IoT applications to building components (Pollo *et al.*, 2021), the authors identify three main families of sensors that could be integrated into envelope components.

**Tracking and identification sensors.** This family includes digital devices that enable ‘product biography’ while providing quick access to information. Specifically, Radio Frequency Identification (RFID) and Near Field Communication (NFC) technologies are the most common IoT devices

for contactless information exchange. Consisting of two main elements, a tag and a reader, the former shares a signal when ‘interrogated’ by the latter. With this in mind, several researchers are investigating the use of RFID tags for prefabricated building components in order to keep track, through BIM platforms, of job order and site management remotely (Chen *et al.*, 2018). Among the most significant examples, Saint-Gobain developed iWin<sup>1</sup>, an RFID tag integrated into the insulated glass unit to access product information (Fig. 1). Such technologies can make data collection faster and more secure in the inventory of an asset, monitor its positioning along the supply chain, quickly identify its physical and material characteristics, or give access to its information history once in use. The asset geolocalisation is particularly effective in the installa-

e orientare differenti processi decisionali. Presenti sul mercato a prezzi limitati, ed estremamente ridotti rispetto al costo del componente edilizio stesso, due sono i principali ambiti di applicazione: l’ottimizzazione del consumo di risorse (es. energia per climatizzazione e illuminazione) e la creazione di nuovi servizi per l’utente (es. *comfort indoor*). I primi consentono un controllo delle prestazioni in opera del bene, la regolazione dei sistemi impiantistici attraverso la rete e, di conseguenza, la possibilità di abilitare contratti basati sulle performance. Un esempio è la startup olandese “Physee - Smart Sustainable Façade”<sup>2</sup> che attraverso l’uso di sensori autoalimentati che individuano temperatura e intensità luminosa integrati nel distanziatore della vetrocamera garantiscono un monitoraggio iperlocale per la regolazione dei sistemi impiantistici (Fig. 2). I secondi, invece, tendono a rispondere a nuovi bisogni. Ad esempio, la maggiore attenzione ai temi della salubrità e qualità dell’ambiente determina la necessità di alimentare dataset ambientali che descrivano in modo più preciso l’interazione tra ambiente costruito, ambiente naturale e utente finale.

tion phases for sites with limited work space or with complex and diverse façade modules.

**Environmental Monitoring Sensors.** The opportunity to monitor indoor and outdoor environmental parameters through a single component introduces new perspectives in the creation of new values and services. Sensors for temperature, humidity, pressure, acoustic sensors, infrared, flow meters, and air quality sensors can generate a dataset and, consequently, a trend history, from which to draw information and orient different decision-making processes. Available on the market at limited prices that are extremely low compared to the cost of the component itself, there are two main areas of application: the optimisation of resource consumption (e.g. energy for air conditioning and lighting) and the creation of new customised services

for the user (e.g. comfort). The former allows control of the asset’s on-site performance, regulation of plant systems through the network and, consequently, the possibility of enabling performance-based contracts. An example is the Dutch start-up ‘Physee - Smart Sustainable Façade’<sup>2</sup> which, through the use of self-powered sensors detecting temperature and light intensity integrated into the spacer of the glazing, guarantees hyperlocal monitoring for the regulation of HVAC systems (Fig. 2). The latter, on the other hand, responds to new needs. For example, increased attention to issues of environmental health and quality determines the need to feed environmental datasets that more accurately describe the interaction between user, built environment, and natural environment. **Asset Monitoring Sensors.** This family refers to the set of physical param-

**Asset Monitoring Sensors.** Questa famiglia fa riferimento all'insieme dei parametri fisici necessari a valutare l'efficienza, le modalità di uso e lo stato di conservazione del sistema tecnologico. Tale famiglia include aspetti come il monitoraggio delle temperature superficiali, la pressione di camere e intercapedini, il controllo dell'umidità interstiziale o del comportamento statico di componenti in opera. L'elevata attenzione al riuso e al riciclo di materiali e componenti implica la necessità, specialmente durante gli audit, di valutare rapidamente le caratteristiche fisiche del bene e il suo stato di conservazione. Tra le esperienze più significative, la startup danese WoodSense<sup>3</sup> ha sviluppato un sensore wireless per componenti edilizi in legno che monitora la percentuale di umidità e segnala eventuali anomalie. Schüco, invece, ha messo a punto un dispositivo integrabile in serramenti nuovi o esistenti apribili, il SenseTrack<sup>4</sup>, per il controllo da remoto delle aperture (Fig. 3). In questo modo, il sensore integrato nel serramento riconosce se la finestra è aperta o chiusa e dialoga con l'impianto di riscaldamento in modo da evitare consumi di energia. Infine, sensori di posizione e accelerometri, già in uso per viadotti e infrastrutture viabilistiche, consentirebbero di tenere traccia di eventuali assestamenti del bene in uso, anticipando così eventuali problemi di carattere statico.

### Il ruolo abilitante dell'IoT

L'azione abilitante dell'IoT nel raggiungere i 5 CBM presentati viene evidenziata attraverso la matrice riportata in seguito (Fig. 4). In particolare, per ogni CBM, 5 azioni chiave per la creazione di valore sono state identificate tramite l'analisi della letteratura. In questo contesto, un'informazione digitale, diffusa e accessibile, diviene un prerequisito essenziale per la transizione

eters required to assess the efficiency, use and state of preservation of the technological system. This family includes aspects such as monitoring surface temperatures, chamber and cavity pressures, interstitial moisture control or the static behaviour of components in place. The high focus on reuse and recycling of materials and components implies the need, especially during audits, to quickly assess the physical characteristics of the asset and its state of preservation. Among the most significant experiences, the Danish start-up WoodSense<sup>3</sup> has developed a wireless sensor for wooden building components that monitors the moisture content and signals any anomalies. Schüco, on the other hand, has developed a device that can be integrated into new or existing openable windows and doors, the SenseTrack<sup>4</sup>, for the remote control of openings

(Fig. 3). The sensor integrated into the window frame thus recognises whether the window is open or closed, and communicates with the heating system to avoid energy consumption. Finally, position sensors and accelerometers, already in use for viaducts and road infrastructures, make it possible to keep track of any settling of the asset in use, thus anticipating any issues related to static behaviour.

### The enabling role of the IoT

The enabling action of the IoT in achieving the 5 CBMs presented is highlighted through the matrix below (Fig. 4). Specifically, for each CBM, 5 key value-creating actions were identified through the literature review. In this context, digital, widespread and accessible information becomes an essential prerequisite for the circular transition. The 5 CBMs are not to be

circolare. I 5 CBM non sono da intendersi in modo a sé stante, ma come strategie integrabili tra loro per un uso intensivo e circolare della materia volto alla creazione di nuovi valori.

La matrice mostra come il Product As a Service sia il modello di business più incline ad essere supportato dalle tecnologie dell'informazione. Questo è dovuto al fatto che l'estensione della responsabilità del bene nelle fasi di post-vendita richieda un



| 02



| 03

## 04 | CIRCULAR FAÇADE

### What information provided by IoT is needed to enable new Circular Business Models?

CIRCULAR BUSINESS MODELS and CIRCULAR ACTIONS		information provided by IoT																					
		Identification	Geolocalization	Product features	Air Temperature	Relative Humidity	Pressure	Light Intensity	Sound	Wind Speed	Water flow	Gases, chemical	Surface Temp.	Inner Moisture	Cavity Pressure	Surface Radiation	Vibration, speed	Air, water flow	Counter	Presence			
<b>Circular Supply Chain</b>		Tracking materials and products		○	○	○	○																
		Tracking processes		○	○																		
		Ensuring short and certified chain		○	○																		
		Optimizing time and cost		○	○																		
		Improving transparency and quality		○		○																	
<b>Recovery and Recycling</b>		Facilitating selective disposal		○	○	○	○																
		Identifying products		○		○																	
		Assessing current asset value			○											○	○	○	○	○	○	○	
		Promoting Material Passport		○	○	○																	
		Reselling products and components		○		○																	
<b>Service Life Extension</b>		Facilitating maintainability		○		○																	
		Fostering predictive maintenance		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		Tracking facility services		○																			
		Providing guide and instructions		○		○																	
		Developing historical trend datasets		○		○											○	○	○	○	○	○	
<b>Product As a Service</b>		Supporting service oriented contract		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		Monitoring in-use performance		○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		Integrating customized services					○	○	○	○	○	○	○	○	○						○	○	
		Updating technological features		○		○														○	○	○	
		Creating new services		○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○					○	○	○	
<b>Shared Platform</b>		Swapping products and/or services		○																			
		Increasing second market		○	○	○																	
		Supporting Urban Mining concept		○		○																	
		Enhancing feedback approach		○													○	○	○	○	○	○	
		Engaging stakeholders					○	○	○	○	○	○	○	○							○	○	

understood in a stand-alone manner, but as strategies that can be integrated with each other for an intensive, circular use of matter aimed at the creation of new values.

The matrix shows that Product As a Service is the business model most likely to be supported by information technology. This is because the extension of responsibility for the good into the after-sales phases requires continuous

monitoring of the system in use. The ability to monitor asset performance via embedded IoT devices may enable new forms of contracting based on the duration or performance offered. In the perspective of promoting the product as a service, the environmental benefits would be twofold. On the one hand, producers and operators would have an incentive to keep the asset in its optimal condition for as long as possible; on

the other hand, end customers would profit by an efficient product/service. These aspects are closely related to the CBM on life extension. The access to maintenance instructions would guarantee, in addition to time and cost savings, proper management of the asset. Moreover, the introduction of sensors to monitor the state of preservation (e.g. number of opening cycles, surface temperatures, humidity, etc.)

could enable a predictive maintenance rationale. Trending of failure modes and recurrence, and identification of the main causes would, in addition to continuously redesigning the technological system, favour the development of after-sales insurance practices. This approach may prove decisive in the face of increasingly complex façade systems and increasingly acute environmental stressors.

controllo continuo del sistema in uso. La capacità di monitorare tramite dispositivi IoT integrati le prestazioni del bene può abilitare nuove forme contrattuali basate sulla durata o sulle performance offerte. Nella prospettiva di promuovere il prodotto come servizio, i benefici in termini ambientali, nonché economici, sarebbero dupli. Da un lato, i fornitori del prodotto-servizio sarebbero incentivati a mantenere il bene nelle condizioni ottimali quanto più a lungo possibile, dall'altro, i clienti finali trarrebbero profitto da un servizio efficiente. Tali aspetti sono strettamente correlati al CBM riguardante l'estensione della vita utile. Il rapido accesso alle istruzioni per la manutenzione garantirebbe, oltre a risparmi in termini di tempi e costi, una corretta gestione del bene. Inoltre, l'introduzione di sensori per il monitoraggio dello stato di conservazione (es. numero cicli aperture, temperature superficiali, umidità, etc.) potrebbe abilitare logiche di manutenzione predittiva.

*Trend* sulle modalità e ricorrenza dei guasti e individuazioni delle principali cause favorirebbe, oltre alla riprogettazione continua del sistema tecnologico, lo sviluppo di pratiche assicurative post-vendita. A fronte di sistemi di facciata sempre più complessi e stress ambientali sempre più acuti, questo approccio può risultare determinante.

Lo sviluppo di piattaforme condivise è fortemente vincolato dall'uso di strumenti digitali e dalla gestione di grandi moli di dati. In questa prospettiva, lo sviluppo di sistemi *cyber-fisici* abiliterebbe la creazione di *feedback* per valutazioni economiche e ambientali sul ciclo di vita, la creazione di mercati per il riuso e il recupero della materia e una maggiore conoscenza sullo stato del patrimonio tecnologico. L'accesso a tali informazioni potrebbe, infatti, favorire lo sviluppo di politiche e incen-

The development of shared platforms are strongly constrained by the use of digital tools and the management of large volumes of data. In this perspective, the development of cyber-physical systems would enable the creation of feedback needed for economic and environmental life-cycle assessments, the creation of markets for the reuse and recovery of materials, and greater knowledge about the state of the technological heritage. Access to such information could, in fact, facilitate the development of policies and fiscal incentives to redevelop the built heritage on the basis of the material flows actually available.

CBM related to the construction of a circular supply chain, and recovery and reuse, can be enabled by information on traceability, geolocation of the asset and access to technical product data. In both cases, with a focus on quality and

transparency of processing, technologies such as RFID systems could facilitate the automation and digitisation of the entire process. The integration of a digital memory, capable of recording certified information on the asset during the different stages of the construction process, can increase the economic and environmental value of the asset in a circular perspective. The control of production stages, transport and assembly on site, the history of maintenance activities, and the monitoring of the disassembly process are the main areas of application.

#### Towards circular and digitally integrated systems

With a view to achieving the circular transition in the façade sector, the adoption of new CBMs is a key action in overcoming the concept of a 'recycling economy' and in promoting a

tivi fiscali atti a riqualificare il patrimonio costruito sulla base dei flussi di materia realmente a disposizione.

I CBM relativi la costruzione di una filiera circolare e il recupero e riuso possono essere abilitati da informazioni riguardanti la tracciabilità, la geolocalizzazione del bene e l'accesso ai dati tecnici di prodotto. In entrambi i casi, ponendo particolare attenzione alla qualità e alla trasparenza delle lavorazioni, le tecnologie come i sistemi RFId potrebbero facilitare l'automazione e la digitalizzazione dell'intero processo. L'integrazione di una memoria digitale, capace di registrare informazioni certificate sul bene durante le diverse fasi del processo edilizio, può incrementare il valore economico e ambientale del bene in ottica circolare. In quest'ottica, il controllo delle fasi di produzione, il trasporto e l'assemblaggio in cantiere, lo storico delle attività di manutenzione, il monitoraggio del processo di disassemblaggio rappresentano i principali ambiti di applicazione.

#### Verso sistemi circolari e digitalmente integrati

Nell'ottica di portare a compimento la transizione circolare nel settore delle facciate, l'adozione di nuovi CBM si prefigurano quali azioni chiave nel superare il concetto di "recycling economy" e promuovere un'economia ricca centrata sul valore della materia. In un mercato in cui le istanze ambientali sono fortemente interrelate a quelle economiche, lo sviluppo di modelli circolari e regenerativi può ripensare la redditività dell'intero sistema. Le innovazioni di prodotto e di processo rappresentano i principali fattori abilitanti per raggiungere una reale diffusione di tali modelli. La ricerca mirava ad individuare il ruolo dell'IoT, quale tecnologia capace di portare una dimensione fortemente innovativa, nell'abilitare

rich economy centred on the value of matter. In a market where environmental concerns are strongly intertwined with economic ones, the development of circular and regenerative models can rethink the profitability of the whole system. Product and process innovations are the main enabling factors to achieve a real diffusion of such models. The research aimed to identify the role of the IoT as a technology capable of bringing a highly innovative dimension in enabling new CBMs through the information produced. The integration of IoT into façade systems thus makes it possible to imagine not too distant scenarios in which the use of the information produced by the asset itself can help us manage it in the best possible way (Fig. 5). It does not seem impossible today to think that an IoT-based façade component could alert the maintenance engineer of any

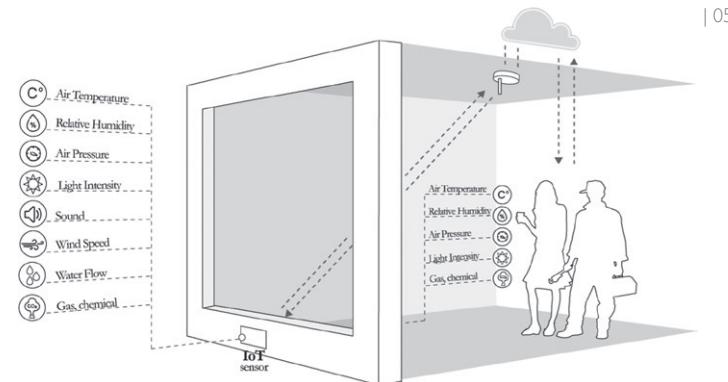
ongoing pathologies, dialogue with the user to optimise comfort and energy consumption, share data on urban platforms regarding outdoor air quality, or provide feedback to investors on the effectiveness of their actions. The most interesting outcome of the IoT in the circular perspective is precisely the introduction of new dematerialised services. Besides fostering a more intensive and rational use of the technological system, the IoT has the capacity to transform the producer of a good into the provider of a service, thus enabling markets based on the exchange of data and innovative contractual forms. The physical-digital integration, however, requires solving still open issues of a technical nature (e.g. signal sharing, system maintainability, sensor lifetime, etc.), environmental nature (e.g. consumption of critical raw materials, data energy consumption), and

nuovi CBM tramite le informazioni prodotte. L'integrazione dell'IoT nei sistemi di facciata consente quindi di immaginare scenari, neanche non troppo lontani, in cui l'utilizzo delle informazioni prodotte dal bene stesso possa aiutarci a gestire il bene nel modo migliore (Fig. 5). Non sembra oggi impossibile pensare che un componente di involucro *IoT-based* possa segnalare al manutentore eventuali patologie in corso, dialogare con l'utente per ottimizzarne il comfort e i consumi energetici, aumentare la reattività di componenti dinamici, condividere dati su piattaforme urbane riguardo la qualità dell'aria outdoor, o fornire agli investitori *feedback* sull'efficacia dei loro investimenti. Proprio l'introduzione di nuovi servizi dematerializzati rappresenta il portato più interessante dell'IoT nella prospettiva circolare. Oltre a favorire un uso più intensivo e razionale del sistema tecnologico, l'IoT ha la capacità trasformare il produttore di un bene in erogatore di un servizio abilitando così mercati basati sullo scambio di dati e forme contrattuali innovative. L'integrazione fisico-digitale, tuttavia, richiede di risolvere questioni ancora aperte di natura tecnica (es. condivisione del segnale, manutenibilità del sistema, vita utile del sensore, etc.), ambientale (es. consumo di materie prime critiche, consumo energetico dei dati) e legale (es. affidabilità dei dati, responsabilità legale del bene nei modelli *Product As a Service*, proprietà dei dati, etc.). Per concludere, le prospettive emerse dalla ricerca, sebbene da validare con i principali attori del sistema, chia- riscono come lo sviluppo di sistemi *IoT-based* possa rappresentare un fattore competitivo per le imprese. Così, come la tecnologia (quella hard) ci ha spinto verso il modello lineare, ora la tecnologia (quella digitale) può trainarci verso nuovi modelli più sostenibili.

legal nature (e.g. data reliability, legal liability of the good in *Product As a Service* models, data ownership, etc.). To conclude, the perspectives that emerged from the research, yet to be validated with the main players of the sector, clarify how the development of IoT-based systems can be a competitive factor for companies. Thus, just as technology (the hard one) drove us towards the linear model, now technology (digital) can drive us towards new and more sustainable models.

#### NOTES

- <sup>1</sup> Available at: <https://iwin.digital>.
- <sup>2</sup> Available at: <https://www.physee.eu/sense/sense-by-physee>.
- <sup>3</sup> Available at: <https://www.woodsense.com>.
- <sup>4</sup> Available at: <https://www.schueco.com/de-en/company/press/schueco-senstrack-wireless>.



#### NOTE

- <sup>1</sup> Available at: <https://iwin.digital>
- <sup>2</sup> Available at: <https://www.physee.eu/sense/sense-by-physee>
- <sup>3</sup> Available at: <https://www.woodsense.com>
- <sup>4</sup> Available at: <https://www.schueco.com/de-en/company/press/schueco-senstrack-wireless>

## REFERENCES

- ARUP (2018), "Building glass into the circular economy. How to guide", available at: [https://ukgbc.org/wp-content/uploads/2018/10/How-to-guide\\_Building-glass-into-CE.pdf](https://ukgbc.org/wp-content/uploads/2018/10/How-to-guide_Building-glass-into-CE.pdf) (Accessed on 31/08/2022)
- Arup and Freiner Reifer (2018), "Design innovation for the Circular Economy", available at: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/facade-design-for-the-circular-economy> (Accessed on 31/08/2022).
- Atzori, L., Iera, A., Morabito, G., (2016), "Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm", *Ad Hoc Networks*, Vol. 56, pp. 122–140. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.12.004>.
- Azcarate-Aguerre, J. F., Klein, T., Konstantinou, T. and Veerman, M. (2022), "Facades-as-a-Service: The Role of Technology in the Circular Servitisation of the Building Envelope", *Applied Sciences*, 12(3), 1267. <https://doi.org/10.3390/app12031267>.
- Bocken, N.M.P., Schuit, C.S.C. and Kraaijenhagen, C. (2018), "Experimenting with a circular business model: Lessons from eight cases", *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Vol. 28.
- Bressanelli, G., Adrogegari, F., Perona, M. and Saccani, N. (2018), "Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies", *Sustainability*, 10(3).
- Chen, K., Xu, G., Xue, F., Zhong, R.Y., Liu, D., and Lu, W. (2018), "A Physical Internet-enabled Building Information Modelling System for prefabricated construction", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 31, pp. 349-361.
- Ghisellini, P., Ripa, M. and Ulgiati, S. (2018), "Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 178, pp. 618-643.
- Giorgi, S., Lavagna, M., Wang, K., Osmani, M., Liu, G., and Campioli, A. (2022), "Drivers and barriers towards circular economy in the building sector: Stakeholder interviews and analysis of five european countries policies and practices", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 336.
- GXN Innovation (2018), *Circle House. Denmark's first circular housing project*. Available at: <https://gxn.3xn.com/project/circle-house> (Accessed on 31/08/2022).
- Ingemarsdotter, E., Jamsin, E. and Balkenende, R. (2020), "Opportunities and challenges in IoT-enabled circular business model implementation – A case study", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 162, 105047.
- Kragh, M. K. and Jakica, N. (2022) "Circular economy in facades", in Gasparri *et al.*, *Rethinking Building Skins*, pp. 519–539. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822477-9.00016-4>.
- Lacy, P. and Rutqvist, J. (2015), *Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage*, Springer. ISBN- 978-1-137-53070-7.
- Langley, D. J. (2022), "Digital Product-Service Systems: The Role of Data in the Transition to Servitization Business Models", *Sustainability*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031303>.
- Pollo, R., Giovanardi, M., and Trane, M. (2021), "Smart Construction Objects. Tools for reprogramming the city", *Agathòn*, Vol. 10, pp. 84-91. <https://doi.org/10.19229/2464-9309/1082021>.
- Rejeb, A., Suhaiza, Z., Rejeb, K., Seuring, S., and Treiblmaier, H. (2022), "The Internet of Things and the circular economy: A systematic literature review and research agenda", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 350, 131439. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131439>.
- Santana, S. and Ribeiro, A. (2022), "Traceability models and traceability systems to accelerate the transition to a Circular Economy: a systematic review", *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14095469>.
- Tukker (2004), "Eight types of product-service system: Eight ways to sustainability? Experiences from suspronet", *Business Strategy and the Environment*, 13, pp. 246-260.
- UNICMI (2021) "Rapporto sul mercato italiano dell'involucro edilizio 2021". Available at: [http://www.unicmi.it/in\\_evidenza/in\\_evidenza/rapporto-unicmi-2021-%11-aggiornamento.html](http://www.unicmi.it/in_evidenza/in_evidenza/rapporto-unicmi-2021-%11-aggiornamento.html) (Accessed on 31/08/2022).

Fabio Bianconi<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-6639-0302>

Marco Filippucci<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-1821-5080>

Giulia Pelliccia<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-8800-9090>

David Correa<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-4399-7897>

<sup>1</sup> Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Italia

<sup>2</sup> University of Waterloo, School of Architecture, Canada

[fabio.bianconi@unipg.it](mailto:fabio.bianconi@unipg.it)

[marco.filippucci@unipg.it](mailto:marco.filippucci@unipg.it)

[giulia.pelliccia@outlook.it](mailto:giulia.pelliccia@outlook.it)

[david.correa@uwaterloo.ca](mailto:david.correa@uwaterloo.ca)

**Abstract.** Il legno equilibra il suo contenuto di umidità rispetto all'ambiente circostante. Le applicazioni tecniche che sfruttano questa caratteristica possono avere un grande impatto sul miglioramento del comfort igrometrico di ambienti interni ma finora le applicazioni che l'hanno sfruttata sono limitate. L'intelligenza naturale igroscopica del legno può portare allo sviluppo di una nuova tecnologia in grado di migliorare il comfort interno. Il materiale naturale può essere ingegnerizzato in composti responsivi fatti di scarti di legno e trasformati attraverso la stampa 4D. Gli attuatori biomimetici studiati in questa ricerca mirano a collegare la trasformazione della forma in funzionalità di controllo ambientale applicata al comfort degli edifici tramite soluzioni adattive e passive.

**Parole chiave:** Compositi in legno; Stampa 4D; Regolazione igrometrica; Controllo passivo; Attuatori responsivi.

## Introduzione

Bassa energia incorporata, basso consumo energetico durante il funzionamento e basso impatto ambientale sono caratteristiche prestazionali critiche per le nuove applicazioni tecniche. Questa esigenza ha portato allo sviluppo e alla ricerca di soluzioni in grado di agire sulle problematiche ambientali in modo sempre più intelligente, autonomo e basato su dati rilevati in tempo reale da sensori. Nei sensori naturali il comportamento è totalmente passivo e i movimenti sono guidati da stimuli specifici, come accade ad esempio durante l'espansione e la contrazione passiva del tessuto igroscopico in seguito a variazioni dell'umidità ambientale (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Elbaum and Abraham, 2014; Elbaum, 2018; Correa *et al.*, 2020). Lo studio dei principi biologici che governano questi comportamenti al fine di ricavare modelli per risolvere problemi o trova-

re soluzioni è chiamato biomimetica (Benyus, 1997; Vincent *et al.*, 2006). Questo approccio mira a creare sensori biomimetici ingegnerizzati attraverso lo studio e l'astrazione di principi da modelli biologici che possono essere successivamente utilizzati per applicazioni tecniche. (Stroble *et al.*, 2009). Negli ultimi 10 anni, l'uso della stampa 3D ha dimostrato un potenziale nello sviluppo di materiali con architetture complesse attraverso la produzione di materiali intelligenti (Mustapha and Metwalli, 2021). La versatilità della manifattura additiva basata sulla tecnologia FDM (*Fused Deposition Modelling*) l'ha resa adatta anche alla realizzazione di sensori di vario tipo e all'impiego in svariati campi (Khosravani and Reinicke, 2020). Il tempo di risposta di un sensore rispetto allo stimolo e la velocità di risposta successiva sono fondamentali per valutare le sue caratteristiche di prestazione. Si parla di stampa 4D (Pei, 2014), un metodo di stampa 3D che è stato utilizzato per produrre sensori la cui reazione è innescata da specifici stimuli esterni come luce, calore, solventi, elettricità o acqua (Tibbits, 2013; Zolfagharian *et al.*, 2016). Tra questi *Stimulus Responsive Materials* (SRMs) (Tibbits, 2013) ci sono quelli che reagiscono alle variazioni di umidità utilizzando filamenti a base di farina di legno (Zuluaga and Menges, 2015; Le Duigou *et al.*, 2016; Tahouni *et al.*, 2020; El-Dabaa, Salem and Abdelmohsen, 2021), fibre continue di materiali igroscopici come il lino (Le Duigou *et al.*, 2021), filamenti a base di cellulosa (Wang *et al.*, 2018; Langhansl *et al.*, 2021), o inchiostri idrogel composti (Sydney Gladman *et al.*,

## Harnessing the natural intelligence of wood to improve passive ventilation in buildings

**Abstract.** Wood actively equalises its moisture content in relation to its surrounding environment. Technical applications that can harness this characteristic can have a great impact in the improvement of indoor hygrometric comfort. So far few applications have made use of this unique property. The natural hygroscopic intelligence of wood can lead to the development of a new technology capable of ensuring improved indoor comfort. The natural material can thus be engineered by creating responsive composites made from wood waste and transformed through 4D printing. The biomimetic actuators studied in this paper are aimed at linking the transformation of form into environmental control functionality applied to building comfort in adaptive and passive solutions.

**Keywords:** Wooden composites; 4D printing; Hygrometric regulation; Passive control; Responsive actuators.

## Introduction

Low embodied energy, low energy consumption during operation and low environmental impact are critical performance characteristics for new technical applications. This requirement has led to the development and search for solutions capable of acting on environmental issues in an increasingly intelligent and autonomous manner, based on real-time sensed data. Natural sensors have a totally passive behaviour and their movements are driven by specific stimuli as happens for instance during passive expansion and shrinkage of hygroscopic tissue after changes in ambient humidity (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Elbaum and Abraham, 2014; Elbaum, 2018; Correa *et al.*, 2020). The study of the biological principles that govern these behaviours in order to derive models to solve problems or

find solutions is called biomimicry (Benyus, 1997; Vincent *et al.*, 2006). This approach aims to create engineered biomimetic sensors through the study and abstraction of principles from biological role models that can be later used for technical applications (Stroble, Stone and Watkins, 2009). Over the past 10 years, the use of 3D printing has demonstrated potential in the development of materials with complex architectures through the production of smart materials (Mustapha and Metwalli, 2021). The versatility of additive manufacturing based on FDM (*Fused Deposition Modelling*) technology has also made it suitable for making sensors of various types and for use in a variety of fields (Khosravani and Reinicke, 2020). How long a sensor takes to respond to a stimulus and how quickly it responds thereafter is critical to assess its performance

2016). L'obiettivo del presente articolo è quello di analizzare le possibili soluzioni responsive realizzate con la tecnologia FDM che, reagendo in modo naturale ai cambiamenti dell'umidità ambientale, potrebbero potenzialmente diventare un fattore chiave per migliorare il comfort e il benessere degli occupanti. L'investimento iniziale nella progettazione e nell'ingegnerizzazione di questi compositi potrebbe produrre benefici a lungo termine, in quanto non presentano componenti elettronici soggetti a guasti e sono indipendenti da fonti di alimentazione esterne. Il comportamento adattivo di questi elementi dipende strettamente dall'architettura dei materiali, che può essere progettata, programmata e simulata attraverso strumenti di progettazione computazionale e *visual scripting* e fabbricata direttamente tramite stampa 3D.

### Il trasferimento dei principi biomimetici dal legno ai compositi stampati in 3D

Il legno è un materiale anisotropo con simmetria ortotropa che presenta tre diversi coefficienti di rigonfiamento che corrispondono all'orientamento della fibratura del legno (tangenziale, longitudinale e radiale) (Giordano, 1981). Queste considerazioni hanno portato diversi gruppi di ricerca a cercare di amplificare le caratteristiche di deformazione del legno, generalmente considerate un difetto del materiale, attraverso la produzione di compositi responsivi (Reichert, Menges and Correa, 2015; Rüggeberg and Burgert, 2015; Vailati *et al.*, 2018). In particolare, trasferendo i principi biomimetici che regolano l'apertura delle squame delle pigne a strutture artificiali ingegnerizzate, è possibile realizzare strutture a doppio strato con una risposta pre-programmata alle va-

characteristics. Referred to as 4D printing (Pei, 2014), this method of 3D printing has been used to produce sensors, whose reaction is triggered by specific external stimuli, such as light, heat, solvents, electricity or water (Tibbits, 2013; Zolfagharian *et al.*, 2016). These Stimulus Responsive Materials (SRMs) (Tibbits, 2013) include those which react to changes in humidity by using wood flour-based filaments (Zuluaga and Menges, 2015; Le Duigou *et al.*, 2016; Tahouni *et al.*, 2020; El-Dabaa, Salem and Abdelmohsen, 2021), continuous fibres of hygroscopic materials, such as flax (Le Duigou *et al.*, 2021), cellulose-based filaments (Wang *et al.*, 2018; Langhansl *et al.*, 2021), or composite hydrogel inks (Sydney Gladman *et al.*, 2016).

The objective of this paper is to investigate possible responsive solutions

made through FDM technology that, by reacting naturally to changes in ambient humidity, could potentially become a key contributor in occupant comfort and well-being. However, the initial investment in design and engineering of said composites could yield long-term benefits as they do not feature failure prone electronic components and are independent of external power sources. The adaptive behaviour of such elements strictly depends on their material architecture, which can be designed, programmed and simulated through computational design tools and *visual scripting*, and directly fabricated via 3D printing.

#### Biomimetic transfer from wood to 3D printed composites

Wood is an anisotropic material with orthotropic symmetry that has three

riazioni di umidità (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Reyssat and Mahadevan, 2009; Reichert, Menges and Correa, 2015). Le differenze nel coefficiente di espansione tra i due strati determinano la flessione del composito indotta dalle sollecitazioni (Le Duigou and Correa 2022). È stato dimostrato che la teoria di Timoshenko (Timoshenko, 1925) per le strisce bimetalliche può essere applicata anche ai *bilayer igroscopici*, sostituendo la temperatura con l'umidità relativa e i coefficienti di espansione termica con i coefficienti igroscopici (Reyssat and Mahadevan, 2009). La risposta dei compositi a doppio strato responsivi all'umidità può anche essere pre-programmata in modo che si trovino in uno stato indeformato per uno specifico valore di umidità relativa, ad esempio il 40%, e inizino a deformarsi per valori superiori o inferiori (Pelliccia *et al.*, 2020).

La stampa 3D è stata utilizzata di recente per fabbricare *bilayers* multi-materiale utilizzando filamenti di materiali compositi di legno e polimeri *Wood Polymer Composites* (WPC) (Correa *et al.* 2015; Correa Zuluaga and Menges 2015; Le Duigou and Correa 2022). I WPCs disponibili in commercio contengono tra il 20% e il 40% di farina di legno in una matrice polimerica, solitamente PLA (Spear, Eder and Carus, 2015; Correa *et al.*, 2020) in modo che il filamento termoplastico possa essere estruso da una stampante 3D FDM (Kariz *et al.*, 2018). La tecnologia FDM consente di personalizzare la direzione di espansione delle fibre, cosa impossibile da ottenere con la fibratura del legno. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dalla possibilità di realizzare il composito tramite un singolo processo di fabbricazione in cui vengono, in un'unica stampa, realizzati lo strato attivo, quello passivo ed eventuali altri strati funzionali. L'utilizzo di simili attuatori igro-responsivi in ambienti indoor può miglio-

different coefficients of swelling, which correspond to the wood grain orientation (tangential, longitudinal and radial) (Giordano, 1981). These considerations have led various research groups to amplify the shape deformation characteristics of wood, generally considered a material defect, through the production of responsive composites (Reichert, Menges and Correa, 2015; Rüggeberg and Burgert, 2015; Vailati *et al.*, 2018). In particular, by transferring the biomimetic principles that regulate the opening of pine cone scales to engineered artificial structures, it is possible to make bilayer structures with a pre-programmed response to changes in humidity (Dawson, Vincent and Rocca, 1997; Reyssat and Mahadevan, 2009; Reichert, Menges and Correa, 2015). The differences in the expansion coefficient between the two layers results in stress-induced bending of the composite (Le Duigou and Correa 2022). It was proved that Timoshenko's theory (Timoshenko, 1925) for bimetallic strips can also be applied to hygroscopic bilayers by substituting temperature with relative humidity, and thermal expansion coefficients with hygroscopic coefficients (Reyssat and Mahadevan, 2009). The response of hygroscopic responsive bilayer composites can also be pre-programmed so that they are in an undeformed state for a specific relative humidity value, for example 40%, and begin to deform for higher or lower values (Pelliccia *et al.*, 2020).

3D printing has been recently used to fabricate multi-material bilayers using wood polymer composite (WPC) filament material (Correa *et al.* 2015; Correa Zuluaga and Menges 2015; Le Duigou and Correa 2022). Commercially available WPCs contain between

rare passivamente le condizioni igrometriche. A tal fine alcune configurazioni di compositi in legno stampati in 4D sono state ideate e realizzate per valutarne il comportamento in condizioni di umidità elevata.

### Sperimentazioni: configurazione geometrica, mesostruttura e variazioni morfologiche

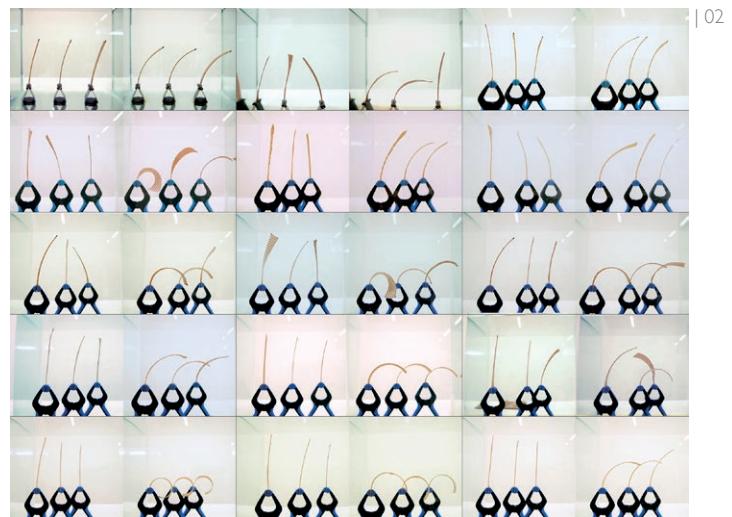
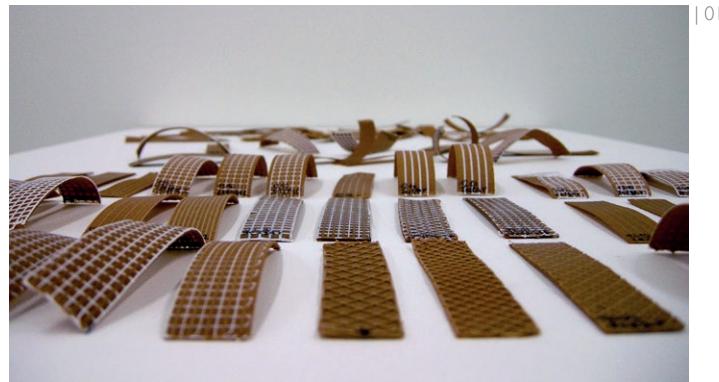
Per realizzare gli attuatori descritti in questo articolo è stata utilizzata una stampante Prusa i3 MK3S+ con ugello da 0,4 mm e filamento Laywoo-D3 per lo strato attivo, composto al 40% da farina di legno e matrice polimerica PLA. In una prima fase sono stati realizzati dei provini rettangolari (Fig. 1), di 20 x 100 mm, con varie combinazioni di strati, pattern, materiali e spessori, al fine di individuare le soluzioni più responsive dopo l'immersione in acqua (Fig. 2).

Durante questa fase preliminare sono stati individuati i principi base per la programmazione delle specifiche mesostrutture. Ciò ha permesso di realizzare e perfezionare un algoritmo di *visual scripting* in Grasshopper che permette di controllare direttamente le variabili di stampa e il percorso di stampa, le quali avranno un impatto fondamentale sul comportamento finale del composito. L'algoritmo consente di definire un gran numero di parametri, tra cui il numero di strati, lo spessore di ogni parte stampata, il pattern, la temperatura e la velocità di stampa a partire da qualsiasi geometria iniziale (Fig. 3). La totale personalizzazione del processo di progettazione e fabbricazione consente di estendere i principi verificati per i provini rettangolari a forme più complesse.

20% and 40% wood flour in a polymer matrix, usually PLA (Spear, Eder and Carus, 2015; Correa *et al.*, 2020) so that thermoplastic filament can be extruded by an FDM 3D printer (Karin *et al.*, 2018). FDM technology allows to customise the grain direction of expansion, which is impossible to achieve with wood grain. A further advantage is represented by the possibility of producing the composite through a single manufacturing process in which, in a single print, the active layer, the passive layer and any other functional layers are made. The use of similar hygro-responsive actuators in indoor environments can passively improve the hygrometric conditions. For that purpose, some configurations of 4D printed wood composites have been designed and fabricated to evaluate their behaviour in high humidity conditions.

### Investigations: geometry configuration, mesostructure and morphological variations

A Prusa i3 MK3S+ printer with a 0.4 mm nozzle and Laywoo-D3 filament for the active layer, composed of 40% wood flour and PLA polymer matrix, were used to make the actuators described in this paper. At first, rectangular specimens (Fig. 1), measuring 20 x 100 mm, were made with various combinations of layers, patterns, materials, and thicknesses in order to identify the most responsive solutions after immersion in water (Fig. 2). During this first preliminary phase, the basic principles were identified to programme the specific mesostructures. This allowed to create and adjust a visual scripting algorithm in Grasshopper, which gives direct control over the printing variables and tool path pattern that will have a critical



impact on the final behaviour of the composite. The algorithm allows a large number of parameters to be defined, including the number of layers, thickness of each printed part, pattern, temperature, and printing speed from any initial geometry (Fig.3). The total customisation of the design and fabrication process makes it possible to extend the principles that were verified for the rectangular specimens to more complex shapes.

After the most suitable properties to obtain rectangular geometries with the highest possible velocity of reaction were established, a single curvature actuator was printed, composed of 10 x 100 mm rectangles having an even higher aspect ratio than 20 x 100 rectangles. A specific workflow was then programmed in Grasshopper to print multiple 10 x 100 mm rectangular modules composed of a passive PLA layer and two Laywood active layers. All modules were printed simultaneously and connected through a TPU filament woven into the overall structure of the layers to obtain a single actuator (Fig. 4). TPU assumes the role of a third functional layer in addition to the active and passive ones. To further amplify the overall deformations, a second case study was then created, which consists of a double curvature actuator. This second structure was obtained by coupling, lengthwise, two single curvature actuators, one of which was printed with the layers in reverse order with respect to the other to obtain an opposite concavity after exposure to the stimulus (Fig. 5). The printing order of the layers determines on which side of the composite the constriction imposed by the passive layer acts and, therefore, the direction of the concavity. The result is to have

Una volta stabilito quali sono le proprietà più adatte per ottenere geometrie rettangolari con una velocità di reazione più elevata possibile, è stato stampato un attuatore a singola curvatura composto da rettangoli di 10 x 100 mm che hanno un *aspect ratio* ancora più elevato rispetto ai rettangoli 20 x 100. È stato quindi programmato un workflow specifico in Grasshopper per stampare più moduli rettangolari 10 x 100 mm composti da uno strato passivo in PLA e due strati attivi in Laywood. Tutti i moduli sono stati stampati simultaneamente e collegati attraverso un filamento in TPU intrecciato nella struttura complessiva degli strati per ottenere un singolo attuatore (Fig. 4). Il TPU assume il ruolo di un terzo strato funzionale oltre a quello attivo e quello passivo.

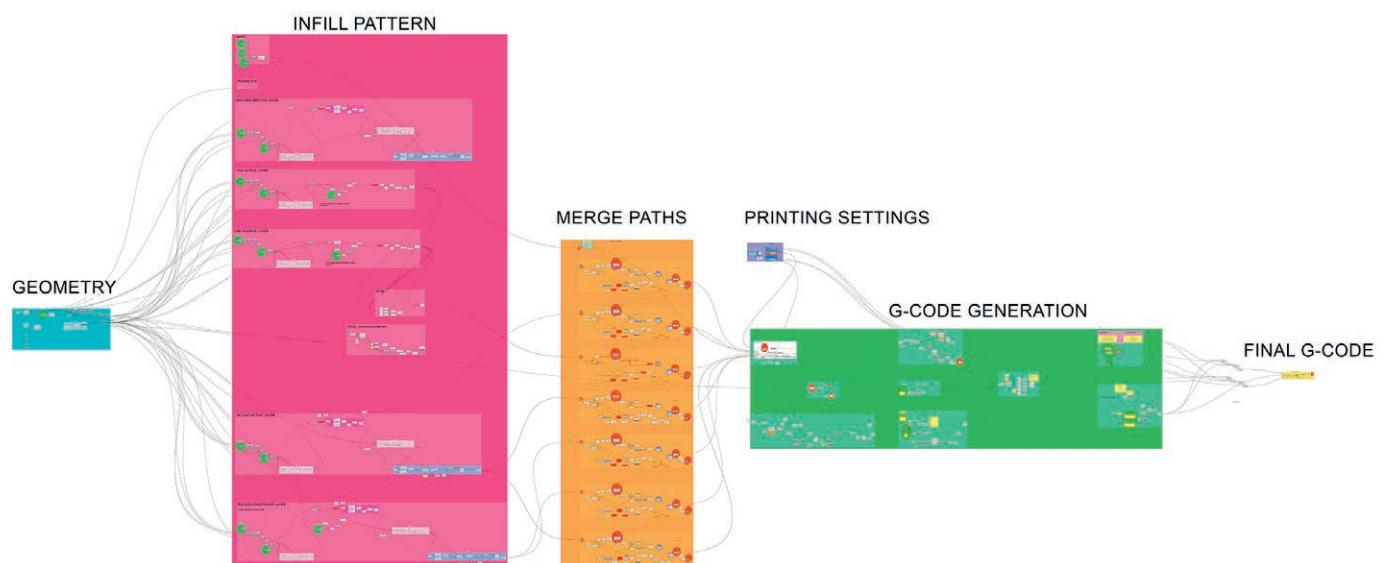
Per amplificare maggiormente le deformazioni complessive è stato poi realizzato un secondo caso studio che consiste in un attuatore a doppia curvatura. Questa seconda struttura è stata ottenuta accoppiando, nel senso della lunghezza, due attuatori a singola curvatura dei quali uno stampato con gli strati in ordine inverso rispetto all'altro per ottenere una concavità opposta dopo l'esposizione allo stimolo (Fig. 5). L'ordine di stampa degli strati determina in quale lato del composito agisce la costrizione imposta dallo strato passivo e, quindi, la direzione della concavità. Il risultato è quello di avere un attuatore a doppia concavità composto da rettangoli 10 x 200 mm che cambiano concavità in corrispondenza dell'asse centrale di simmetria.

## Risultati e discussione

I test iniziali su provini rettangolari 20 x 100 mm hanno fornito indicazioni per regolare la progettazione della mesostruttura per i due attuatori oggetto di studio. Innanzitutto, l'*aspect*

*ratio* è una delle principali caratteristiche geometriche che influenza la responsività: maggiore è una dimensione rispetto all'altra, maggiore sarà la curvatura. È stato poi osservato che il pattern a zig-zag è il più adatto per lo strato attivo, in quanto consente di enfatizzare l'espansione nella direzione ortogonale a quella del filamento depositato. Ciò comporta un'amplificazione della deformazione complessiva. Per lo strato passivo, sia il PLA che l'ABS sono risultati adatti con pattern lineari o a griglia. Secondo la teoria di Timoshenko, più sottile è lo strato passivo rispetto allo strato attivo, maggiore è l'ampiezza della curvatura. Per avere la massima responsività sono state quindi preferite soluzioni con un singolo strato passivo sottile. Il terzo materiale, il TPU, è stato utilizzato non solo per creare un'unica struttura da più attuatori grazie alla sua capacità di adattarsi elasticamente alla loro curvatura, ma anche per garantire una migliore adesione tra lo strato passivo a griglia in PLA e gli strati attivi.

Lo scopo della ricerca è quello di studiare i compositi 4DP a base di legno per adattarli come meccanismi passivi per facciate igro-responsive. I compositi sono stati quindi stampati il più sottili possibile, in modo che il loro tempo di reazione possa seguire le fluttuazioni giornaliere dell'umidità. Gli attuatori a singola concavità, stampati combinando più moduli di base rettangolari, hanno mostrato un alto livello di cambiamento di forma complessivo. La responsività è infatti uno degli aspetti più rilevanti per creare attuatori in grado di adattarsi rapidamente alle fluttuazioni dell'umidità ambientale. Osservando il comportamento degli attuatori immersi in acqua, l'attuatore a concavità singola impiega circa due ore per raggiungere la massima curvatura, mentre quello a doppia concavità richiede circa



- 04| La mesostruttura dell'attuatore a singola concavità, ottenuto accoppiando rettangoli 10 x 100 mm, mostra la stratificazione dei materiali e dei pattern per ottenere la deformazione desiderata  
*The mesostructure of the single concavity actuator, made by coupling 10 x 100 mm rectangles, shows how materials and patterns are layered to achieve the desired deformation*

- 05| La mesostruttura dell'attuatore a doppia concavità, ottenuto accoppiando nel senso della lunghezza due degli attuatori a singola concavità, è stata concepita per avere un unico attuatore con due concavità opposte  
*The mesostructure of the double concavity actuator was conceived to have a single actuator with opposite concavity*

- 06| Le reazioni all'umidità del primo attuatore a singola concavità (A) e del secondo a doppia concavità (B)  
*The reactions of the first single concavity actuator (A) and the second double concavity one (B) to humidity*

quattro ore per raggiungere una curvatura completa di entrambi i lati (Fig. 6). Ciò può essere dovuto alla maggiore dimensione del secondo attuatore rispetto al primo, che si traduce quindi in un tempo più elevato per completare il ciclo di assorbimento-desorbimento.

I casi di studio sono stati sviluppati per applicazioni indoor, per essere applicati ad esempio come moduli per facciate interne personalizzabili, in cui gli elementi responsivi possono essere aggiunti o rimossi consentendo una maggiore o minore ventilazione (Fig. 7). Gli attuatori si trovano in condizioni di equilibrio e, quindi, nella loro configurazione piatta non deformata, per umidità relative tra il 40% e il 50%. In presenza di variazioni di umidità, gli attuatori reagiscono passivamente curvandosi e consentono di ventilare in maniera naturale l'ambiente. Gli attuatori igroscopici a base di legno hanno un comportamento reversibile che consente loro di portarsi in equilibrio costante con l'ambiente circostante e tornare alla configurazione iniziale per valori di umidità ottimali.

## Conclusioni

Le attuali sfide ambientali richiedono lo sviluppo di metodi più sostenibili per migliorare le prestazioni degli edifici. In particolare, riscaldamento, raffreddamento, illuminazione e ventilazione hanno un impatto a lungo termine sull'impronta ecologica degli edifici.

a double curvature actuator composed of 10 x 200 mm rectangles that change concavity in correspondence with the central axis of symmetry.

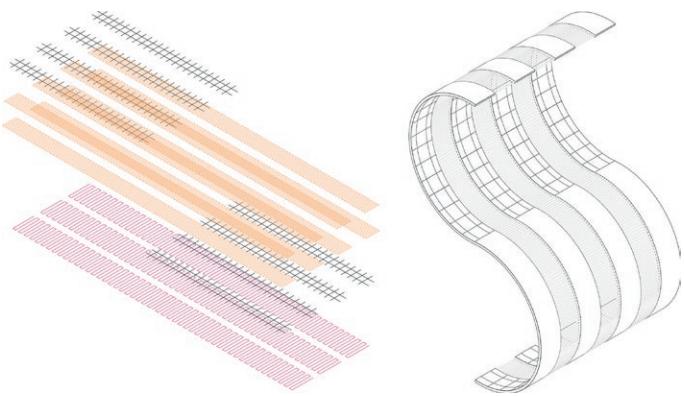
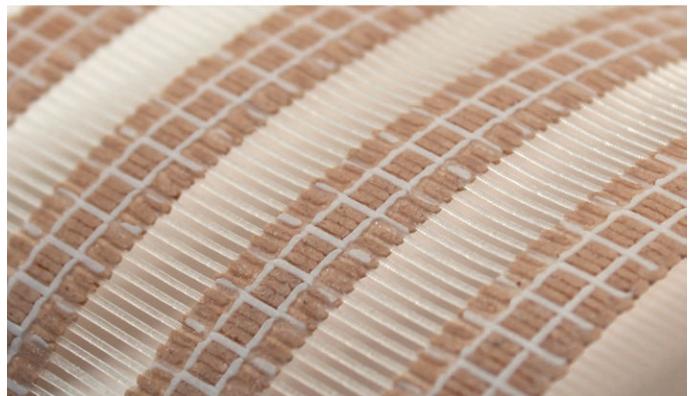
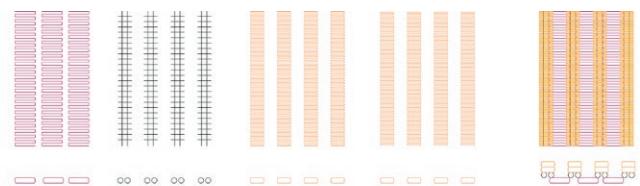
## Results and discussion

Initial tests on rectangular 20 x 100 mm specimens have provided guidance to adjust the mesostructure design of the two studied actuators. First of all, the aspect ratio is one of the main geometric characteristics that influences responsiveness: the longer one dimension is compared to the other, the greater the curvature will be. It was then observed that the zig-zag is the most suitable for the active layer, as it allows to emphasise expansion in the direction orthogonal to that of the deposited filament. This results in an amplification of the overall deformation. For the passive layer, both PLA and ABS were found to be suitable

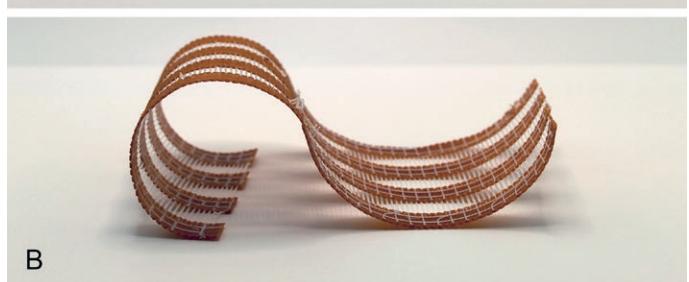
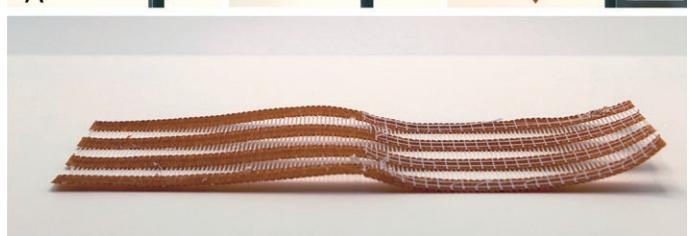
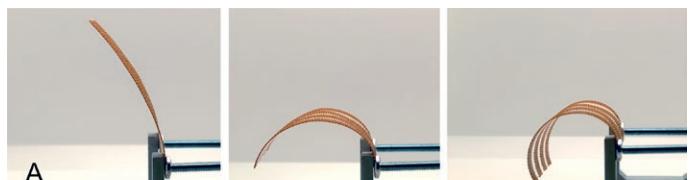
with linear or grid patterns. Following Timoshenko's theory, the thinner the constraint layer relative to the expansion layer, the larger the amplitude of the curvature. Solutions with a thin single constraint layer have, therefore, been preferred in order to have the greatest responsiveness. The third material, TPU, was used here not only to create a single structure from multiple actuators due to its ability of elastically adapt to their curvature, but also to ensure an improved adhesion between the grid PLA constraint layer and the expansion ones.

The aim of the research is to study wood-based 4DP composites to adapt them as passive mechanisms for hydro-responsive façades. The composites were then moulded as thin as possible so that their reaction time could follow daily humidity fluctuations. The single curvature actuators, printed by

| 04



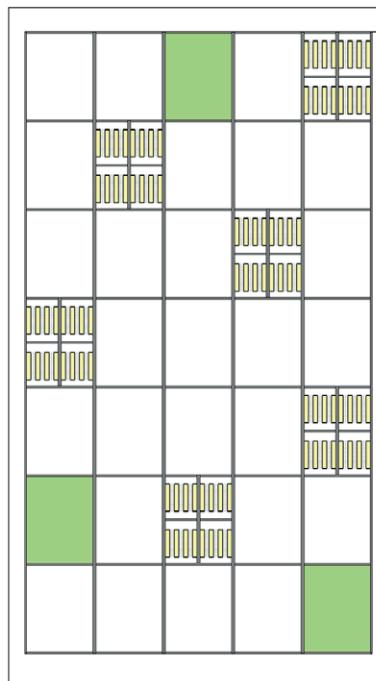
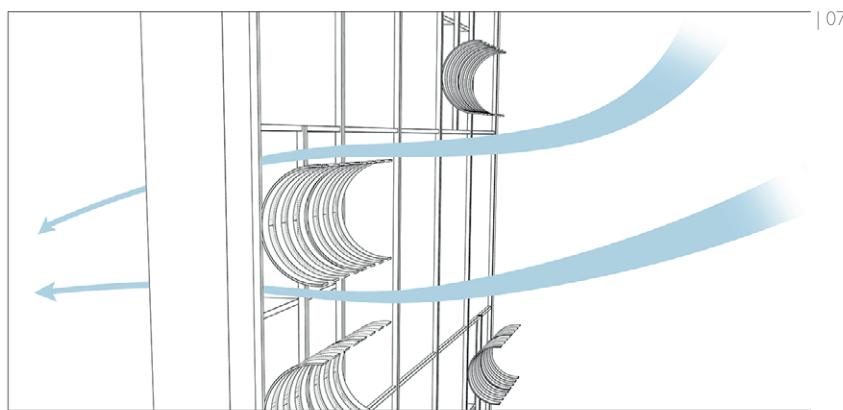
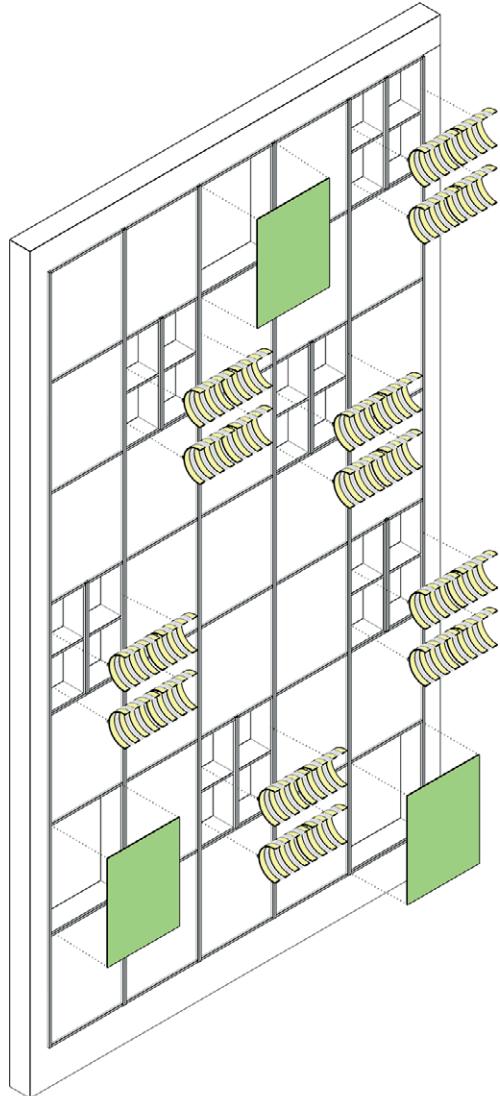
| 05



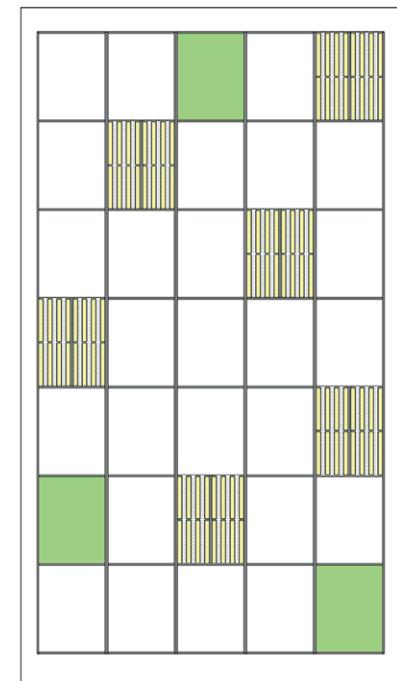
gica operativa di un edificio. Questo impatto può essere mitigato adottando strategie passive che non gravano ulteriormente sui consumi e che possono avvalersi di materiali naturali a basso impatto ambientale. In particolare, si sta sempre più diffondendo in vari settori l'impiego di sensori e attuatori intelligenti che possono essere stampati tramite tecnologia FDM. La versatilità della stampa 3D consente infatti di creare sensori biomimetici ingegnerizzati che derivano dall'applicazione di principi da modelli biologici.

La programmazione dei materiali tramite attuatori passivi può potenzialmente offrire soluzioni per migliorare gli ambienti

interni, utilizzando materiali rinnovabili a basso costo e costi operativi a lungo termine ridotti. L'architettura degli *Stimulus Responsive Materials* (SRM) può essere programmata attraverso algoritmi di *visual scripting* e stampata in 4D in base allo stimolo e al comportamento desiderato. In questo articolo, i composti igro-responsivi sono stati fabbricati utilizzando un'architettura funzionale in WPC che applica la teoria di Timoshenko per generare un'attuazione cinematica in risposta agli stimoli ambientali. Il risultato del cambiamento di forma di questi attuatori dipende strettamente dalla geometria iniziale e dalle proprietà di stampa. Combinando diversi strati funzionali tra loro è possibile stam-



open: high relative humidity



closed: low relative humidity

pare attuatori la cui reazione all’umidità produce una deformazione significativa. È stato osservato che le soluzioni sviluppate iniziano a flettersi pochi minuti dopo l’esposizione allo stimolo e raggiungono la massima deformazione in poche ore. La differenza di comportamento dipende da vari fattori legati alle proprietà di stampa e a fattori relativi alla forma dell’attuatore. Si cerca, in particolare, di massimizzare non solo la deformazione, ma anche la velocità di risposta. I due attuatori realizzati, uno a concavità singola e l’altro a doppia concavità, hanno raggiunto la massima deformazione in acqua in tempi che vanno dalle due alle quattro ore. Questo comportamento può essere trasferito alla progettazione di facciate responsive che deumidifichino passivamente l’ambiente interno. I meccanismi di apertura/chiusura potrebbero consentire una ventilazione naturale grazie alle sole proprietà intrinseche dei materiali, alla particolare geometria e alla mesostruttura degli attuatori stampati.

La ricerca presentata si configura come un ulteriore passo verso l’applicazione dei compositi igro-risponsivi all’architettura. I limiti attuali sono da ricercarsi principalmente nei materiali utilizzati che non consentono ancora una totale predicitibilità del comportamento a breve e lungo termine. Nelle ricerche future potrebbero essere sperimentate le medesime configurazioni, meccanismi e principi utilizzando materiali igroscopici diversi, in cui i cicli di assorbimento-desorbimento siano totalmente reversibili e la reazione alle variazioni di umidità relativa sia ancora più marcata. Un limite ulteriore è costituito dalla scala attuale degli attuatori, limitata dalle dimensioni delle stampanti 3D utilizzate. Nel futuro potrebbero essere sviluppati degli attuatori a scala maggiore, impiegando stampanti diverse oppure attraverso l’unione di più attuatori.

combining multiple rectangular base modules, showed a high level of overall shape change. Responsivity is, in fact, one of the most important aspects for creating actuators capable of quickly adapting to fluctuations in ambient humidity. Looking at the behaviour of actuators immersed in water, the single concavity actuator takes about two hours to reach full concavity, while the double curvature one takes about four hours to reach full curvature on both sides (Fig. 6). This may be due to the larger size of the second actuator compared to the first, which, therefore, results in longer time to complete the absorption-desorption cycle. The case studies have been developed for indoor applications, to be applied for example as modules for customisable indoor façades, where responsive elements can be added or removed, allowing for more or less ventilation

(Fig. 7). The actuators are in equilibrium conditions and, therefore, in their undeformed flat configuration for relative humidity between 40% and 50%. When exposed to humidity variations, the actuators react passively by bending and allow the room to be ventilated naturally. Wood-based hygroscopic actuators have a reversible behaviour that allows them to reach constant equilibrium with the surrounding environment and return to their initial configuration for optimal humidity values.

#### Conclusion

Current environmental challenges require the development of more sustainable ways of improving building performance. Particularly, heating, cooling, lighting and ventilation loads have a long-term impact in the operational footprint of a building. This

#### RINGRAZIAMENTI

L’articolo presenta alcuni esiti di un percorso di ricerca intrapreso presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell’Università degli Studi di Perugia. In tale percorso si inseriscono un tirocinio curriculare per tesi di laurea presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali dell’Università degli Studi Firenze e delle borse di studio finanziate dall’impresa di costruzioni in legno Abitare+ di Perugia con il contributo del POR FESR 2014-2020 della Regione Umbria. La ricerca è proseguita con una tesi di dottorato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell’Università degli Studi di Perugia con una collaborazione con la School of Architecture della University of Waterloo (Canada).

#### REFERENCES

- Benyus, J.M. (1997), *Biomimicry: innovation inspired by nature*. New York: Harper Perennial.
- Correa, D. et al. (2020), “4D pine scale: Biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 378, p. 2167.
- Dawson, C., Vincent, J.F. V and Rocca, A.M. (1997), “How pine cones open”, *Nature*, Vol. 390, n. 6661, p. 668.
- Le Duigou, A. et al. (2016), “3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality”, *Materials and Design*, Vol. 96, pp. 106-114, available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>.
- Le Duigou, A. et al. (2021), “4D printing of continuous flax-fibre based shape-changing hygromorph biocomposites: Towards sustainable metamaterials”, *Materials & Design*, Vol. 211, p. 110158.
- El-Dabaa, R.B., Salem, I. and Abdelmohsen, S. (2021), “Digitally Encoded Wood: 4D Printing of Hygroscopic Actuators for Architectural Responsive Skins”, in ASCAAD 2021 – Architecture in the Age of Disruptive Technologies, Cairo, pp. 240-252.

impact can be mitigated by adopting passive strategies, which do not further influence energy consumption and which can make use of natural materials with low environmental impact. In particular, the use of intelligent sensors and actuators that can be printed using FDM technology is increasingly spreading in various sectors. The versatility of 3D printing makes it possible to create engineered biomimetic sensors that derive from the application of principles from biological models. Material programming via passive actuators can potentially offer solutions to improve indoor environments while using low cost renewable materials and ensuring low long-term operational costs. The material architecture of specific Stimulus Responsive Materials (SRMs) can be programmed through visual scripting algorithms and 4D printed according

to the desired stimulus and behaviour. In this paper, hygro-responsive composites were fabricated using a functional WPC architecture that applies Timoshenko’s theory to generate kinematic actuation in response to weather-related stimulus. The shape-change result of these actuators strictly depends on the initial geometry and printing properties. By combining multiple techniques and modules, it is thus possible to print actuators, whose reaction to humidity produces a significant deformation. It was proven that the developed solutions start bending few minutes after the exposure to the stimulus and reach the maximum deformation in a few hours. The difference in behaviour depends on various factors related to the printing properties and factors associated with the shape of the actuator. In particular, the goal is to maximise not only the defor-

- Elbaum, R. (2018), "Structural principles in the design of hygroscopically moving plant cells", *Plant Biomechanics: From Structure to Function at Multiple Scales*, pp. 235-246.
- Elbaum, R. and Abraham, Y. (2014), "Insights into the microstructures of hygroscopic movement in plant seed dispersal", *Plant Science*, Vol. 223, pp. 124-133.
- Giordano, G. (1981), *Tecnologia del legno. 1, La materia prima*, UTET.
- Kariz, M. et al. (2018), "Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts", *Materials Today Communications*, Vol. 14, pp. 135-140.
- Khosravani, M.R. and Reinicke, T. (2020), "3D-printed sensors: Current progress and future challenges", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 305, p. 111916.
- Langhansl, M. et al. (2021), "Fabrication of 3D-printed hygromorphs based on different cellulosic fillers", *Functional Composite Materials*, Vol. 2, p. 1.
- Mustapha, K.B. and Metwalli, K.M. (2021), "A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites", *European Polymer Journal*, Vol. 156, p. 110591.
- Pei, E. (2014), "4D printing: Dawn of an emerging technology cycle", *Assembly Automation*, Vol. 34, n. 4, pp. 310-314.
- Pelliccia, G. et al. (2020), "Characterisation of wood hygromorphic panels for relative humidity passive control", *Journal of Building Engineering*, Vol. 32, p. 101829.
- Reichert, S., Menges, A. and Correa, D. (2015), "Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness", *Computer-Aided Design*, Vol. 60, pp. 50-69.
- Reyssat, E. and Mahadevan, L. (2009), "Hygromorphs: from pine cones to biomimetic bilayers", *Journal of the Royal Society Interface*, Vol. 6, n. 39, pp. 951-957.
- Rüggeberg, M. and Burgert, I. (2015), "Bio-Inspired Wooden Actuators for Large Scale Applications", *PLoS one*, Vol. 10, n. 4, p. e0120718.
- Spear, M.J., Eder, A. and Carus, M. (2015), "Wood polymer composites", *Wood Composites*, pp. 195-249.
- Stroble, J.K., Stone, R.B. and Watkins, S.E. (2009), "An overview of biomimetic sensor technology", *Sensor Review*, Vol. 29, n. 2, pp. 112-119.
- Sydney Gladman, A. et al. (2016), "Biomimetic 4D printing", *Nature Materials*, Vol. 15, n. 4, pp. 413-418.
- Tahouni, Y. et al. (2020), "Self-shaping Curved Folding: A 4D-printing method for fabrication of self-folding curved crease structures", *SCF 2020 Proceedings: ACM Symposium on Computational Fabrication*, pre-print available at: <https://doi.org/10.1145/3424630.3425416>.
- Tibbits, S. (2013), "The emergence of 4D printing", TED conference.
- Timoshenko, S. (1925), "Analysis of Bi-Metal Thermostats", *JOSA*, Vol. 11, n. 3, pp. 233-255.
- Vailati, C. et al. (2018), "An autonomous shading system based on coupled wood bilayer elements", *Energy and Buildings*, Vol. 158, pp. 1013-1022.
- Vincent, J.F. et al. (2006), "Biomimetics: its practice and theory", *Journal of the Royal Society, Interface*, Vol. 3, n. 9, pp. 471-482.
- Wang, Q. et al. (2018), "3D printing with cellulose materials", *Cellulose*, Vol. 25, n. 8, pp. 4275-4301.
- Zolfagharian, A. et al. (2016), "Evolution of 3D printed soft actuators", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 250, pp. 258-272.
- Zuluaga, D.C. and Menges, A. (2015), "3D printed hygroscopic programmable material systems", *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 1800, pp. 24-31.

mation, but also the speed of reaction. The two studied actuators, one with a single curvature and the other with a double curvature, reached the maximum deformation in water from two to four hours. Such behaviour can be transferred to the design of responsive façades that passively dehumidify the indoor environment. The opening/closing mechanisms could allow natural ventilation thanks only to the inherent properties of the materials, the particular geometry and the meso-structure of the printed actuators. The research presented is configured as a further step towards the application of moisture-responsive composites to architecture. The current limits are mainly to be found in the materials used, which do not as yet allow for total predictability of short and long-term behaviour. In future research, the same configurations, mechanisms and

principles could be tested using different hygroscopic materials in which the absorption-desorption cycles are totally reversible, and the reaction to changes in relative humidity is even stronger. A further limitation is the current scale of the actuators, limited by the size of the 3D printers used. In the future, larger scale actuators could be developed, using different printers or by joining multiple actuators.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This paper presents some results of a research developed at the Department of Civil and Environmental Engineering of the University of Perugia. This path includes a curricular internship for a master's degree thesis at the Department of Agricultural, Food, Environmental and Forestry Sciences and Technologies of the University of Florence, and scholarships financed

by the wooden construction company of Perugia, Abitare+, with the contribution of the POR FESR 2014-2020 of the Regione Umbria. The research continued with a doctoral thesis at the Department of Civil and Environmental Engineering of the University of Perugia in collaboration with the School of Architecture of the University of Waterloo (Canada).

a cura di **Antonella Violano**, <https://orcid.org/0000-0002-5313-3988>

Un Dialogo di/A Dialogue of **Anna Maria Giovenale** con/with **Pietro Montani**

## Introduzione

**Antonella Violano:** L'innovazione del processo progettuale, traghettato verso la Transizione Digitale già con il Piano Nazionale della Ricerca 2021-27 e con tutte le linee di indirizzo della *Social and Cultural Innovation*, trascina gli attori di questo processo in un'arena competitiva in cui i partecipanti al gioco si dividono in soggetti proattivi, che decidono le regole, si contendono i primati e plasmano il futuro, e soggetti ricettivi che si limitano, si fa per dire, a proporre e attuare sperimentazioni progettuali. Questo contesto culturalmente competitivo è basato sul controllo di una gran quantità di dati grazie alla potenza di calcolo dei nuovi strumenti pensati per prefigurare scenari, misurare impatti e verificare l'efficacia degli interventi. Ma il cambiamento è non solo delineabile nei nuovi strumenti messi a disposizione dall'innovazione tecnologica digitale, che ha ampi margini di azione e di intervento trasversale sul secondo pilastro del Global Challenges and European Industrial Competitiveness, è culturalmente descrivibile e inscrivibile nel nuovo paradigma concettuale del progetto: senza assecondare logiche produttive di stampo tecnocratico, si può operare per passare dal ruolo di fornitore di servizi a quello di promotori di comunità.

Con l'intelligenza artificiale, in grado di immagazzinare un numero impressionante di dati e di fatto acquisire una conoscenza esperienziale in base alla quale rimodellare ed elaborare soluzioni in modo veloce ed efficace, la Transizione Digitale potrebbe trasformarsi in un "eccesso di delega tecnica", per dirla con le parole di Pietro Montani, e assumere una connotazione assolutamente degenerante soprattutto in un campo come

quello dell'architettura, nel quale il progetto è da sempre il frutto dell'azione creativa del "genio" dell'architetto, che interpreta il Genius Loci e lo trasforma in spazio di qualità per abitare o svolgere funzioni vitali.

«Bisogna assolutamente continuare a mantenere la propria capacità interpretativa prima, e creativa poi, per poter dare un segno veramente autentico, unico e irriproducibile, che sia il segno di un'idea» e l'ipotesi che venga meno questo sapere creativo ed emozionale ci turba.

Tralasciando l'industria, che utilizza la tecnologia 4.0 per rendere più veloce e precisa la produzione, per il progetto possiamo parlare di Transizione Complessiva quando riusciamo ad attuare processi progettuali *rigenerativi e human centred* nei quali la Tecnologia risponde a obiettivi di uso ridotto (Approccio *Total Low*) e appropriato (Approccio della Sufficienza) di tutte le tipologie di risorse (materiali e immateriali, naturali e sociali, energetiche, umane, culturali ed economico-finanziarie) scelte, applicate e gestite in tutte le fasi del processo, fin oltre la tomba (le 10 R della *Circular Economy*). All'uso responsabile di queste risorse sono associate le "principali responsabilità ideative ed esecutive del progetto". Affidare alla "macchina" le decisioni progettuali entro scenari multidimensionali di sostenibilità sembra non essere una peregrina ipotesi nel momento in cui le regole composite e tecniche debbano rispondere unicamente a requisiti minimi riducibili a range numerici; ma al di là delle n possibili soluzioni attuabili che la macchina può fornire, rispondenti perfettamente ai canoni normativi cogenti, si spera abbia sempre valore agli occhi degli utenti/clienti l'unicità del pensiero creativo umano. Del resto, l'uomo è il primo attore e

## NEW DIGITAL FRONTIERS FOR DESIGN: A PROACTIVE/ INTERACTIVE PROCESS

### Introduction

**Antonella Violano:** The innovation of the design process, already led towards the Digital Transition with both the National Research Plan 2021-27 and all the guidelines for *Social and Cultural Innovation*, involves the actors of this process into a competitive arena, where the players are divided into proactive subjects, who decide the rules, compete for the records and shape the future, and receptive subjects who are limited, so to speak, to proposing and implementing design experiments. This culturally competitive context is based on the control of a large amount of data, thanks to the computing power of the new instruments designed to both prefigure scenarios, and measure impacts, and verify the effectiveness of interventions. The change is not only delineated in the new instruments available thanks to the digital

technological innovation, which has wide leeway and transversal intervention on the second pillar of the Global Challenges and European Industrial Competitiveness, but it is also culturally describable and inscribable in the new conceptual paradigm of the Plan: without supporting any technocratic production logics, it is possible to move from the role of service provider to that one of community promoters. The Digital Transition may turn into an "excess of technical delegation", using Pietro Montani's words, with artificial intelligence, able to store an impressive number of data and acquire an experiential knowledge, according to which you can remodel and elaborate solutions quickly and effectively; it may have an absolutely degenerative connotation, especially in a field like that one of architecture, where design has always been the result of the

creative action of the architect's "genius", who interprets the Genius Loci and transforms it into a quality space, where to live in or perform vital functions.

«It is absolutely necessary to continue maintaining first of all your own interpretative skill, and then your creative one, to give a truly authentic, unique and irreproducible mark, which is the mark of an idea», and we feel upset in case this creative and emotional knowledge lacks.

Leaving out the industry, which uses 4.0 technology to make production faster and more precise, we can talk about Global Transition for design when we can implement *regenerative* and *human-centred* design processes, where Technology responds to goals of reduced (Total Low Approach) and appropriate (Sufficiency Approach) usage of all types of resources (tangible

fruitore del cambiamento di paradigma derivante dalla digitalizzazione dei processi (PNR 21-27, Articolazione 1. Servizi human-centred). Tanto più sensibile, responsabile e consapevole sarà la domanda dell'utenza, tanto più la tecnologia potrà agire da interfaccia tra utenti e fattori ambientali, ma mai da surrogato.

Su questi temi prendono la parola Anna Maria Giovenale e Pietro Montani, invitati a dare il loro punto di vista esperto.

### Strumenti digitali e processo propositivo del progetto

*zionario il modo di progettare, costruire, gestire le opere di architettura, in particolare hanno trasformato una serie di passaggi obbligati, propedeutici e sequenziali, così anche le modalità collaborative tipiche della progettazione tradizionale che si sviluppavano attraverso incontri e discussioni tra i diversi specialisti del team progettuale.*

*Nel caso dello strumento Digital Twin, gli edifici vengono ad essere direttamente collegati all'ambiente fisico attraverso l'Internet of Things (IoT) e questo comporta, senz'altro, come è scientificamente dimostrato da diverse sperimentazioni progettuali, anche una radicale trasformazione nei processi di gestione e di controllo delle risorse.*

*Inoltre, l'integrazione di diversi strumenti e di diverse tecnologie digitali consente di configurare scenari, di creare modelli pre-dittivi e di poter operare, per tempo, scelte consapevoli soprattutto riguardo la fase di gestione e di manutenzione degli edifici.*

*L'ambiente di condivisione dati (ACDat), a monte del processo*

and intangible, natural and social, energy, human, cultural and economic-financial resources) chosen, applied and managed at all phases of the process, beyond the grave (the 10 Rs of the Circular Economy). The responsible use of such resources is associated with the "main creative and executive responsibilities of the design». Entrusting design decisions to the "machine" within multidimensional sustainability scenarios does not seem to be a pernicious hypothesis, when the compositional and technical rules must respond only to minimum requirements that can be reduced to numerical ranges; we hope that the uniqueness of human creative thinking will always have value for users/customers beyond the different possible, feasible solutions that the machine can provide, perfectly matching the mandatory standards. Moreover, man is the first actor and

user of the paradigm change resulting from the digitalization of processes (PNR 21-27, Articulation 1. Human-centered services). The more sensitive, responsible, and aware the users' demand will be, the more technology can act as an interface between users and environmental factors, but never as a substitute.

Anna Maria Giovenale and Pietro Montani intervene on these topics, being invited to give their expert point of view.

### Digital tools and design proactive process

*Anna Maria Giovenale: Tools such as Building Information Modelling and Digital Twin have certainly revolutionized the way of designing, building, managing architectural works, particularly they have changed a series of compulsory, preparatory, and sequential*

*di progettazione impone che tutti i dati riguardanti il progetto siano noti prima ancora dei successivi stadi di approfondimento tecnico.*

*Un ambiente digitale di raccolta e di condivisione di dati strutturati in informazioni relative a modelli ed elaborati digitali riferiti ad un'opera di architettura consente informazioni aggiornate, fornendo tutti gli aspetti collaborativi e di integrazione necessari per gestire in maniera consapevole le decisioni.*

*Da una parte quindi, gli ACDat incrementano, nel processo di progettazione, l'efficacia dell'azione degli operatori favorendo metodi di lavoro snelli, dall'altra rendono possibile l'integrazione e la connessione di flussi informativi finalizzati ad elaborazioni in tempo reale, fino alla possibilità di operare con algoritmi pre-dittivi a supporto dei processi decisionali.*

*Se da una parte, quindi, sono stati innovati completamente gli strumenti relativi al processo di progettazione, connaturandolo sempre di più a quello della costruzione e della successiva gestione con il fine concreto di raggiungere la tanto agognata interoperabilità e, soprattutto, l'efficienza e l'efficacia rispetto ai tempi e ai costi di realizzazione di un'opera, dall'altra c'è il rischio della standardizzazione delle soluzioni, del venir meno di quell'attività creativa, propositiva, di relazione specifica con il contesto di riferimento, che possa fungere da stimolo per soluzioni non convenzionali e, quindi anche per migliorare la qualità progettuale. Di fronte al tema della standardizzazione, che in qualche misura, ci riporta al passato della cultura tecnologica, emerge nuovamente la profonda differenza tra il prodotto industriale e quello edilizio: il prodotto industriale standardizzato è progettato per essere riprodotto su scala in maniera ripetuta, il prodotto edilizio è caratterizzato dalla sua unicità determinata prevalentemente*

*steps, as well as the collaborative methods typical of traditional design that were developed through meetings and discussions among the different specialists of the design team.*

*In the case of Digital Twin tool, buildings are directly connected to the physical environment through the Internet of Things (IoT), and this certainly involves a radical transformation in the processes of management and control of the resources, too, as it is scientifically proved by various design experiments.*

*Moreover, the integration of different tools and different digital technologies allows to configure scenarios, create predictive models and be able to make informed choices on time, especially regarding the management and maintenance phase of the buildings.*

*The Common Data Environment (AC-Dat), upstream of the design process, requires that all data concerning the de-*

*sign are known even before the following phases of technical study.*

*A digital environment for collecting and sharing structured data in information, concerning models and digital elaborations, referring to an architectural work, allows updated information, providing all the collaborative and integration aspects necessary to consciously manage decisions.*

*On the one hand, therefore, ACDat increases the effectiveness of the operators' action in the design process, favoring lean working methods, on the other hand they make it possible to integrate and connect information flows aimed at real-time processing, up to the possibility of operating with predictive algorithms to support decision-making processes.*

*So, on the one hand, the tools related to the design process have been completely innovated, deeply rooting such a process more and more in that one of construc-*

*dalle sue relazioni con il contesto territoriale, ambientale, storico, economico, culturale. In una logica di questo tipo, sempre di più la progettazione non si configura come un segmento di un processo lineare, seppur ampio e complesso, in relazione alle caratteristiche intrinseche o estrinseche dell'opera stessa.*

*Una riflessione in questo senso andrebbe portata avanti innovando il concetto di qualità tecnologica nelle sue diverse accezioni, partendo dalla sua ridefinizione nel processo, attraverso le innovazioni intervenute nel progettare e nel costruire, fino al prodotto finale, tenendo conto dell'importanza degli strumenti di digitalizzazione e, contemporaneamente, dell'unicità dell'opera da realizzare e del ruolo di regista delle trasformazioni dell'ambiente costruito che è proprio il progettista.*

**Pietro Montani:** Vorrei provare a ripercorrere il quadro molto limpido che hai disegnato assumendo il punto di vista di un'estetica filosofica interessata in particolare al problema dell'abitare.

Il primo dato che emerge, sotto questo profilo, è che le tecnologie digitali e l'intelligenza artificiale hanno condotto il fenomeno della delega tecnica – da sempre rilevante nell'esperienza specie-specifica dell'essere umano – fino a un'incidenza finora sconosciuta ma anche, e questa è una novità significativa, fino a una soglia sulla quale la domanda sulle principali responsabilità ideative ed esecutive del progetto (inteso qui in senso generico) comincia a diventare molto concreta e inquietante. La sinergia tra il progettista e le risorse tecnologiche di cui la configurazione del progetto può oggi servirsi, in altri termini, comincia davvero a diventare opaca, nel senso che non è affatto chiaro quale sia il gioco delle parti e quanta autonomia, nella fatti-

*tion and subsequent management with the real aim of achieving the long-awaited interoperability and, above all, efficiency and effectiveness with respect to the times and costs of a work realization; on the other hand, there is the risk of solution standardization, the loss of that creative, proactive activity, of specific relationship with the reference context, which can act as a stimulus for unconventional solutions and, therefore, also improve the design.*

*The profound difference between the industrial product and the building product emerges again with the issue of standardization, which, to some extent, brings us back to the past of technological culture: the standardized industrial product is designed to be reproduced on a scale repeatedly, while the building product is characterized by its uniqueness, determined mainly by its relationships with the territorial,*

*environmental, historical, economic, cultural context. In such a logic, design is not configured as a segment of a linear process, even being large and complex, in relationship with the intrinsic or extrinsic characteristics of the work itself. In such a sense, a reflection should be made by innovating the concept of technological quality in its various meanings, starting from its redefinition in the process, through the innovations occurred in designing and building, up to the final product, considering the importance of digitization tools and, at the same time, the uniqueness of the work to be carried out and the role of the director of the transformations of the built environment that is precisely the designer.*

**Pietro Montani:** I would like to retrace the very clear picture you have drawn from a philosophical aesthetics point

specie, possa essere imputata ai protocolli automatizzati (per esempio agli algoritmi) nell'impostazione e nella risoluzione dei problemi. Uno sciame di droni, ad esempio, segue regole esecutive autonome che da un certo momento in poi non sono più modificabili dall'intervento umano. Analogamente, tutte le macchine capaci di *deep learning* da un certo momento in poi si sottraggono al controllo umano nella produzione delle rispettive regole di apprendimento, delle quali sappiamo che risultano sovrapponibili solo in piccola parte a quelle di cui i nostri cervelli incarnati si sono provvisti nel corso dell'evoluzione. Ora, il fatto che una macchina 'impari' in modo diverso da come lo fa l'essere umano può essere considerato un fatto del tutto irrilevante solo se lo si giudica dal punto di vista dei suoi risultati, che oggi, soprattutto dopo l'introduzione delle cosiddette reti neurali antagoniste nel dispositivo del *deep learning*, garantiscono una precisione sempre maggiore. Ma se questo tipo di automazione dovesse caricarsi anche di prestazioni decisionali è evidente che lo scenario cambierebbe di molto. Non ne va solo della standardizzazione del prodotto finale. È in gioco anche un processo più ampio e profondo che si configura come un inavvertito "eccesso di delega tecnica".

Un'alternativa secca sembra profilarsi su questa soglia: progettare in funzione dei protocolli automatici e delle esigenze dell'intelligenza artificiale o, viceversa, riqualificare gli uni e le altre in funzione delle qualità intrinseche del progetto stesso. È su questo piano, direi, che l'architettura può diventare un campo di sperimentazione particolarmente fecondo e per certi aspetti esemplare anche in rapporto ad altri campi, essendo in gioco, in architettura, la questione basilare dell'abitare. È quanto accennavi tu a proposito della "qualità tecnologica".

of view, interested particularly in the problem of living.

The first datum emerging from this profile, is that digital technologies and artificial intelligence have led the phenomenon of technical delegation – which has always been relevant in the species-specific experience of the human being – to an unknown incidence so far but also, and this is a meaningful news, up to a threshold on which the question about the main creative and executive responsibilities of the design (here meant in a generic sense) begins to become very concrete and disturbing. The synergy between the designer and the technological resources, which the configuration of the design can now use, in other words, really begins to become opaque, in the sense that it is not clear at all what the game of the parties is and how much autonomy, in this case, can be attributed to automati-

ed protocols (for example algorithms) in setting up and solving problems. A swarm of drones, for example, follows autonomous executive rules that, from a certain moment on, are no longer modifiable by human intervention. Similarly, from a certain moment on, all machines capable of *deep learning* escape from human control in the production of their respective learning rules, of which we know that they are only partially superimposable to those that our embodied brains have provided themselves with, during evolution. Now, the fact that a machine 'learns' differently from how the human being does can be considered completely irrelevant only if we judge it for its results, which guarantee greater and greater precision nowadays, especially after the introduction of the so-called antagonistic neural networks in the *deep learning* device. If this type of au-

Due esempi, rispettivamente della prima e della seconda delle situazioni appena menzionate ci faranno vedere meglio la posta in gioco. Oggi comincia a profilarsi la tendenza a progettare ambienti *IA friendly*, cioè spazi abitabili pensati – su diversa scala, da un edificio a un quartiere a una città – in funzione delle prestazioni cooperative imputabili all'intelligenza artificiale. Inutile sottolineare i vantaggi di questa direttrice progettuale perché sono sotto gli occhi di tutti. Meno chiaro è se le finalità oggettive di questa tipologia progettuale consistano in un miglioramento della qualità della vita umana (su diversi piani, compreso quello della vita associata e delle forme del 'comune') o se non consistano, piuttosto, in un miglioramento della fitness dei dispositivi tecnici impiegati. Per dirla in modo un po' paradossale: se è vero che da sempre l'essere umano ha integrato in modo determinante qualcosa di tecnico nei suoi processi di individuazione (si pensi solo alla scrittura), nel frame che ho appena abbozzato comincia a non essere più così chiaro se a individuarsi sia l'essere umano integrato tecnicamente o non piuttosto l'elemento tecnico integrato umanamente. Se non si stiano, cioè, profilando processi di individuazione diversamente 'proporzionati' quanto alla sinergia – ripeto: originaria e strutturale – tra umano e 'macchinico' le cui regole del gioco sono diventate opache.

L'alternativa a questa situazione inquietante l'ho definita evocando le "qualità intrinseche del progetto stesso". Mi riferisco a un progettare capace di onorare le forme del *debito* del progettista nei confronti degli ambienti reali, da sempre peculiare dell'architettura, sperimentando aree di intersezione innovative tra il reale e il virtuale. Nuovi bilanciamenti. Nuovi e dinamici rapporti di forza tanto spregiudicati quanto selettivi. Ben ven-

tation had to be loaded even with decision-making performances, clearly the scenario would change a lot. We do not miss only the standardisation of the final product. A broader and deeper process is also involved, which is configured as an inadvertent "excess of technical delegation".

A decisive alternative seems to be emerging on this threshold: designing according to automatic protocols and artificial intelligence needs or, vice versa, requalifying both of them, according to the intrinsic qualities of the design itself. It is at this level, I would say, that architecture can become a particularly productive field of experimentation and, for some aspects, exemplary also in relationship with other fields, since the basic question of living is involved in architecture. This is what you mentioned about "technological quality".

Two examples, respectively of the first and the second situation among those just mentioned, will give us a better look at what is at stake. Nowadays, there is a tendency to design *AI-friendly* environments, that is living spaces designed – on a different scale, from a building to a neighborhood to a city – according to the cooperative performance attributable to artificial intelligence. It is useless to underline the advantages of such a design direction as everybody can see them. It is less clear if the objective goals of this type of design consist in an improvement on the quality of human life (at different levels, including that one of associated life and the "shared" forms), or if they do not consist in an improvement on the fitness of the technical devices used. Paradoxically speaking: if it is true that the human being has always decisively integrated something

gano, allora, tutti i nuovi dispositivi che riqualificano le forme della *presenza*, come il recentissimo *Google Project Starline* grazie al quale posso collegarmi con un interlocutore in 3D grazie a un sottile schermo trasparente che me lo fa percepire come co-presente nello spazio in cui mi trovo; ma, insieme, severa attenzione critica nei confronti dei dispositivi che mirano a *sostituire* l'elemento ambientale reale piuttosto che a *integrarlo*, come nel caso della simulazione di presenza costruita in realtà virtuale. Si tratta solo di un principio di carattere generale, è vero, ma si tratta di un principio sufficientemente chiaro nel suo carattere oppositivo (integrazione vs sostituzione) da aprire un ampio range di sperimentazioni possibili.

### Tecnologia e interattività

**A.M.G.** *A proposito di sperimentazioni, una visione innovativa e aperta del progetto di architettura, attraverso le rapide trasformazioni introdotte dai metodi e dagli strumenti di digitalizzazione, dovrebbe estendere sempre di più la propria sfera di azione sull'interattività e sull'inclusione sociale. In questo ambito, credo ci sia un tema fondamentale che riguarda l'accesso alle conoscenze: c'è da chiedersi, ad esempio, se e in che modo la Tecnologia interagisca concretamente con le persone, con gli eventuali fruitori di modelli di città evolute, sostenibili, tanto da poter garantire la funzionalità stessa dei possibili modelli.*

*Nell'affrontare le opportunità offerte dalle tecnologie digitali e dallo sviluppo sostenibile, dal rinnovato tema della città e degli edifici, interpretati come "sistemi ad elevata complessità", credo che occorra sempre considerare tutti gli attori coinvolti, creare le condizioni di esperienza: un processo dinamico tra chi crea e chi è utilizzatore.*

technical in his/her own identification processes (just think of writing), in the frame I have just sketched, it begins not to be so clear if it is determined the technically integrated human being, or the humanly integrated technical element. That is, if we are not profiling processes of identification that are differently 'proportionate' as to the (original and structural) synergy between human and 'machinic' whose game rules have become opaque.

I defined the alternative to this disturbing situation by evoking the "intrinsic qualities of the design itself". I'm referring to a design that can honor the forms of the designer's *debit* towards real environments, which has always been peculiar to architecture, experimenting with innovative areas of intersection between the real and the virtual; new balances, new dynamic power relationships that are as unscrupulous as selective. So, all the new devices requalifying the forms of *presence* are welcome, such as the recent *Google Project Starline*, thanks to which I can be connected with a 3D interlocutor through a thin transparent screen that makes me perceive it as co-present in the space where I am; but at the same time, a severe critical attention must be paid to the devices aiming at *replacing* the real environmental element rather than *integrating it*, as in the case of presence simulation built in virtual reality.

It is only a general principle, it is true, but it is a sufficiently clear principle in its oppositional character (integration vs substitution) that allows to open a wide range of possible experiments.

### Technology and interactivity

**A.M.G.** *Speaking of experimentation, an innovative and open vision of archi-*

*Più di trent'anni fa hanno iniziato a diffondersi modelli di sviluppo urbano caratterizzati dall'uso delle tecnologie digitali e frequentemente sono stati rilevati, da una parte una diffusa mancanza di cultura e di visione strategica della committenza pubblica nell'attuare i progetti, dall'altra una ripetuta scarsità di coerenza con le esigenze reali dei cittadini fruitori, della collettività.*

*Mi riferisco, riguardo quest'ultimo punto in particolare, a quanto dicevi circa la mancanza di chiarezza sulle finalità oggettive di alcune tipologie progettuali che sembrerebbero più orientate al miglioramento dei dispositivi tecnici impiegati, che al potenziamento della qualità della vita.*

*Scenari che, auspicabilmente, sembrerebbero essere in una fase di cambiamento, che si dovrebbero evolvere attraverso le recenti opportunità (es. Programma Next Generation EU, PNRR), attraverso il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile come chiave di interpretazione di piani, progetti finalizzati a migliorare prioritariamente e concretamente la qualità della vita, utilizzando anche le tecnologie digitali come mezzo per raggiungere gli scopi prefissati.*

*Gli aspetti più significativi e, quindi, anche i rischi da correre, risiedono nel non perdere mai una visione di sviluppo sistematico e di coinvolgimento di tutti gli attori.*

*In questo ambito, attraverso un'apparente contraddizione, la Tecnologia ha tutte le potenzialità per rivestire un ruolo di rilievo: essere il perno per lo sviluppo di un ecosistema per l'innovazione in Architettura, per creare luoghi di sperimentazione, di contaminazione, diffusione e trasferimento delle applicazioni di strumenti digitali e di Intelligenza Artificiale in ambienti fisici, che soddisfino le esigenze reali.*

*tectural design, through the rapid transformations introduced by digitization methods and tools, should increasingly extend its sphere of action on interactivity and social inclusion. In such a context, I think there is an essential topic concerning the access to knowledge: we must wonder, for example, if and how Technology interacts concretely with people, with any users of evolved, sustainable city models, so that they can guarantee the functionality of the possible models.*

*Facing the opportunities offered by digital technologies and sustainable development, by the renewed topic of the city and buildings, interpreted as "highly complex systems", I believe that it is always necessary to consider all the actors involved to create the conditions of experience: a dynamic process between the creators and the users.*

*More than thirty years ago, urban devel-*

*opment models characterized by using digital technologies began to spread and it was often noticed, on a hand, a dif-fused lack of culture and strategic vision of public customers in implementing designs, on the other hand, a repeated lack of coherence with the citizens and community's real needs.*

*Particularly about this last point, I'm referring to what you said about the lack of clarity on the objective purposes of some types of design that would seem more oriented to the improvement of the technical devices used, than to the enhancement of the quality of life. Such scenarios, hopefully, seem to be in a changing phase, they should evolve through recent opportunities (for example Next Generation EU Program, PNRR), and the achievement of the sustainable development goals as a key to interpret plans and designs aimed at concretely improving the quality of life*

**P.M.** Hai richiamato l'attenzione su un punto – quello dell'interattività – tanto qualificante quanto spesso inteso in un senso formalistico. In realtà, non c'è nulla di così intimamente partecipativo quanto l'architettura. Nel senso che le modifiche e le riorganizzazioni da parte di chi lo utilizza sono sempre state costitutive dello spazio architettonico in quanto tale. Se a questo aggiungiamo che il requisito dell'interattività è uno di quelli che caratterizza in modo più significativo ed efficace le tecnologie digitali, il tema assume un rilievo straordinario.

Una *smart city* dovrebbe consentire ai suoi abitanti un tasso di interattività molto elevato, differenziato e continuativo. Ma che cosa bisogna intendere con questa formulazione, di per sé difficilmente contestabile? La mia idea è che la distinzione tra ambienti sostitutivi e ambienti integrativi si possa e si debba far valere anche in questa prospettiva. Interagire, infatti, significa ampliare il quoziente di sensibilità dell'ambiente alle *esigenze* e alle *iniziativa* di chi lo abita. Entrambe, esigenze e iniziative, dovrebbero poter essere patrocinate dalla particolare *plasticità* che si può prevedere di conferire agli spazi architettonici *smart*. Dove per "esigenze" bisogna intendere un range che va dalle condizioni basiche dell'abitare fino alla sua dimensione più ampiamente politica, quella nella quale l'idea stessa del "pubblico" viene messa alla prova e, quando necessario, rigenerata con atti innovativi.

Ciò che intendo con "iniziativa" definisce un contrassegno ancor più fondamentale, e qualificante, dell'interattività. Prendiamo l'esempio delle cosiddette installazioni artistiche interattive visitabili nei musei o nelle grandi gallerie pubbliche e private. Il visitatore non ci mette troppo a scoprire se l'interazione che sta effettuando con l'ambiente, modesta o appariscente che sia,

*as a priority, also using digital technologies to reach the goals set.*

*The most meaningful aspects and, therefore, also the risks to be taken, lie in never losing a vision of systemic development and involvement of all actors. In this context, through an apparent contradiction, Technology has all the potentialities to play an important role: to be the pivot to both develop an ecosystem for innovation in Architecture, and create places of experimentation, contamination, diffusion, and transfer of applications of digital tools and Artificial Intelligence in physical environments satisfying real needs.*

**P.M.** You drew our attention to a point – the interactivity one – as qualifying as it is, often meant in a formalistic sense. In fact, there is nothing as intimately participatory as architecture. In the sense that the modifications and

reorganizations from those who use it have always been constitutive of the architectural space as such. The topic takes an extraordinary importance also if we add that the requirement of interactivity is one of those that most significantly and effectively characterizes digital technologies.

A *smart city* should allow its inhabitants a very high, differentiated, and continuous rate of interactivity. What is to be meant by this formulation, which is difficult to dispute in itself? My idea is that the distinction between substitute and integrative environments can and must also be applied in this perspective. Interacting, in fact, means expanding the quotient of sensitivity of the environment to the *needs* and *initiatives* of those who live there. Both needs and initiatives should be able to be supported by the particular *plasticity*, which can be expected

è già tutta predisposta dal programma del dispositivo tecnologico che la gestisce oppure consente la comparsa di eventi imprevedibili e l'esercizio di un'azione che abbia la caratteristica di modificare il programma stesso. Solo in questo secondo caso, a mio avviso, si può davvero parlare di interattività. Soltanto, cioè, quando il dispositivo tecnico si dimostri capace di registrare le iniziative dei suoi utenti e di modificarsi in base ad esse cogliendo nell'interazione qualcosa che si costituisce come un *inizio*, una nuova concatenazione nella quale si potranno inserire, in futuro, ulteriori componenti.

Nelle installazioni artistiche interattive questa fattispecie, riconosciamolo, è rarissima. Per contro, ciò che ho appena descritto accade di regola, e in modo molto fisiologico, negli spazi architettonici. Almeno in quelli riusciti. Ma, di nuovo, gli spazi interattivi riusciti non possono che essere ambienti integrativi, quelli sostitutivi essendo caratterizzati da un'interattività totalmente programmata, che non consente alcuna autentica iniziativa, nel senso appena precisato, e che, inoltre, si avvantaggia costantemente delle azioni dell'utente per 'datificarle', profilarle e convertirle in supplementi algoritmici passivizzanti. È nella specifica cura delle aree di intersezione tra reale e virtuale, in definitiva, che il tema dell'interattività e della partecipazione può giocare le sue migliori carte progettuali.

#### REFERENCES

European Research Area and Innovation Committee/ERAC Secretariat 1201/20 (2020), *ERAC Opinion on the future of the ERA*, adottata dall'assemblea plenaria dello ERAC il 17 dicembre 2019.

to give to *smart* architectural spaces. "Needs" stand for a range that goes from the basic conditions of living to its more broadly political dimension, the one where the idea of the "public" itself is tested and, when necessary, regenerated with some innovative acts. What I mean by "initiative" defines an even more essential and qualifying mark of interactivity. Let's take the example of the so-called interactive art installations that can be visited in museums or in large public and private art galleries. The visitor does not spend too long to find out if the modest or flashy interaction, he/she is making with the environment, is already completely programmed by the technological device that manages it or allows the appearance of unpredictable events and the exercise of an action that has the characteristic of modifying the program itself. Only in this second

case, in my opinion, we can really talk about interactivity; that is, only when the technical device shows to be able to record its users' initiatives and modify itself according to them, catching in the interaction something that is a *beginning*, a new concatenation where further components may be inserted in the future.

This particular case, let's face it, is very rare in interactive art installations. Instead, what I have just described happens as a rule, and in a very physiological way, in architectural spaces. At least in the successful ones. But, again, successful interactive spaces can only be integrative environments, the substitute ones being characterized by a totally programmed interactivity, which does not allow any authentic initiative, in the sense just specified, and which, moreover, constantly takes advantage of the user's actions to 'datafy'

them, profile them and convert them into passive algorithmic supplements. It is in the specific care of the areas of intersection between real and virtual, ultimately, that the topic of interactivity and participation can play its best design cards.

a cura di/edited by **Francesca Giglio**, <https://orcid.org/0000-0002-5047-754X>

## Introduzione

### *Ruoli abilitanti della tecnologia*

Nell'era della transizione ecologica e digitale, l'avanzamento del progresso tecnologico, derivante dalla quarta rivoluzione industriale, assume un ruolo rivoluzionario, dirompente e abilitante il cambiamento dei processi di ricerca, progettazione, fabbricazione e realizzazione dell'architettura. Le possibilità messe in campo dall'avanzamento tecnologico aprono, quindi, la strada ad una nuova antologia dell'architettura, in cui forma e funzione si evolvono nel tempo a favore di prestazione, determinando la nascita di sistemi complessi, in cui le tecnologie digitali assumono un ruolo attivo nei processi ideativi e creativi del progetto edilizio, comportando la necessità di una riflessione profonda sia sulla figura del progettista sia degli aspetti sociali, tecnici, linguistici. La Rubrica Recensioni di questo numero di TECHNE contribuisce al dibattito in corso attraverso tre testi i cui tre autori – rispetto alla loro formazione di architetti e docenti – descrivono e prefigurano scenari, potenzialità e rischi del contesto in cui operiamo.

Il primo testo, a carattere disciplinare *Ipersostenibilità e tecnologie abilitanti. Teoria, metodo e progetto*, Aracne editrice (2019) è di Consuelo Nava ed è recensito da Maria Federica Ottone<sup>1</sup>. Il testo, attraverso cinque lezioni, applicazioni nelle sperimentazioni presentate e nuovi paradigmi indagati, tratteggia aspetti di cultura tecnologica nel progetto per la sostenibilità e l'innovazione attraverso i processi e i dispositivi rigenerativi, abilitanti e performativi, deputati a gestire le risorse naturali e artificiali in modelli circolari. M.F. Ottone evidenzia come C. Nava restituiscce la complessità e la grande varietà di questioni sulle quali la nostra disciplina si sta da qualche tempo interro-

gando, tracciando un nuovo percorso che fa emergere temi che di volta in volta sembrano essere utili a comprendere le dinamiche di trasformazione dell'ambiente costruito, anche attraverso le esperienze progettuali ad esse legate. Un testo quasi provocatorio secondo M.F. Ottone, rispetto alla capacità dell'autrice di consentire al lettore di avere una lettura alternativa al rapporto dicotomico teoria/prassi. Un approccio alle questioni che, per chi recensisce, è molto vicino a quello di Eduardo Vittoria, capace cioè di vedere la tecnologia come fattore progettante e in grado di rispondere ai problemi delle persone, un modo per migliorare complessivamente la qualità della vita.

Il carattere abilitante della Tecnologia, nel progetto di Architettura, continua ad essere protagonista anche nel secondo testo – anch'esso a carattere disciplinare *The Digital Culture of Architecture. Note sul cambiamento cognitivo e tecnico tra continuità e rottura*, Maggioli Editore (2020), di Sergio Russo Ermolli, recensito da Serena Baiani<sup>2</sup>. Il volume, articolato in due parti, pone la cultura digitale come paradigma di “cambiamento cognitivo e tecnico”, interrogandosi sul senso della Transizione in cui Digitale e Cultura Materiale si allineano in una innovata *interazione*. S. Baiani evidenzia come S.R. Ermolli ridefinisce criticamente il rapporto del digitale con il progetto, confutando l'affermazione di N. Leach “l'architettura digitale non esiste”, attraverso l'osservazione, su diversi livelli, del ruolo degli strumenti, delle metodologie e dei processi digitali nella nuova cultura tecnologica del progetto. Le tecnologie digitali spostano il tema sulla centralità del pensiero più che sugli strumenti, riorientando la ricerca progettuale verso la “nuova materialità dell'architettura”. Il paradigma contemporaneo “digital minimal” ridefinisce, infine, il rapporto tra processo ideativo

## Introduction

*Enabling roles of Technology*. In the era of ecological and digital transition, the advancement of technological progress resulting from the fourth industrial revolution takes on a revolutionary, disruptive and enabling role in changing the processes of research, design, fabrication and implementation of architecture. The possibilities brought into play by technological advancement, therefore, pave the way for a new anthology of architecture, in which form and function evolve over time in favor of performance, leading to the emergence of complex systems, in which digital technologies take an active role in the ideational and creative processes of building design, implying the need for deep reflection on both the figure of the designer and the social, technical, and linguistic aspects. The Reviews Rubric in this current

Techne issue contributes to the ongoing debate through three texts whose three authors – with respect to their backgrounds as architects and professors – describe and foreshadow scenarios, potentials and risks of the context in which we operate.

The first text, with a disciplinary orientation *Ipersostenibilità e tecnologie abilitanti. Teoria, metodo e progetto*, Aracne editrice (2019) by Consuelo Nava and is reviewed by Maria Federica Ottone<sup>1</sup>. The text, through five lectures, applications in the experiments presented and new paradigms investigated, sketches aspects of technological culture in the project for sustainability and innovation through regenerative, enabling and performative processes and devices, deputed to manage natural and artificial resources in circular models. M.F. Ottone highlights how C. Nava restores the complexity and great variety of is-

sues on which our discipline has been wondering for some time, tracing a new path that brings out themes that from time to time seem to be useful to understand the dynamics of transformation of the built environment, also through the design experiences related to them. An almost provocative text according to M.F. Ottone, with respect to the author's ability to allow the reader to have an alternative reading to the dichotomous theory/practice relationship. An approach to the issues that, for the reviewer, is very close to that of Eduardo Vittoria, that is, able to see technology as a designing factor and able to respond to people's problems, a way to improve the quality of life overall.

The enabling character of Technology, in the Architecture design, continues to take center stage in the second text – also disciplinary in nature *The Digital Culture of Architecture. Note sul cambia-*

*mento cognitivo e tecnico tra continuità e rottura*, Maggioli Editore (2020), by Sergio Russo Ermolli, reviewed by Serena Baiani<sup>2</sup>. The two-part volume puts digital culture as a paradigm of “cognitive and technical change”, questioning the meaning of the Transition in which Digital and Material Culture align in an innovative interaction. S. Baiani highlights how S.R. Ermolli critically redefines the relationship of the digital with the project, refuting N. Leach's statement “digital architecture does not exist”, through observing, on different levels, the role of digital tools, methodologies and processes in the new technological culture of the project. Digital technologies shift the issue to the centrality of thought rather than tools, reorienting design research toward the “new materiality of architecture”. Finally, the contemporary “digital minimal” paradigm redefines the rela-

e processo realizzativo, in cui il progettista agisce sul codice, *genoma digitale*, per riuscire a definire e controllare il ciclo di vita dell'architettura, all'interno di un processo parametrico. L'esemplificazione di sette categorie – Informazione, Interazione, Simulazione, Ottimizzazione, Personalizzazione, Integrazione e Selezione – analizzate e strutturate da G. Gallucci, completa la trattazione, definendo gli elementi della cultura digitale attraverso i quali fornire un'interpretazione del progetto di architettura.

Il terzo testo *Architecture in the Age of Artificial Intelligence. An Introduction to AI for Architects*, Bloomsbury (2022), di Neil Leach è recensito da Marina Rigillo<sup>3</sup>. Il testo esamina come le diverse manifestazioni dell'IA influenzino la disciplina e la professione dell'architettura e come l'IA sia già utilizzata come potente strumento di progettazione. M. Rigillo si sofferma sul carattere pervasivo dell'AI nell'architettura e nell'immaginario artistico ed evidenzia come sia condizionata dalla unicità del pensiero ideativo, tipizzato da Boden nelle categorie del *combinatorial, exploratory e transformational creativity*. Queste, a loro volta, esprimono forme di intelligenza che si attivano al profilarsi di condizioni e richieste inedite: i termini *swarm intelligence, ambient intelligence e architectural intelligence* rimandano all'interazione tra comportamenti individuali e collettivi, e alla pressione prodotta da uno o più agenti di cambiamento. M. Rigillo evidenzia la natura ibrida delle AI come il superamento del dualismo tra un'intelligenza artificiale e una naturale, che deriva principalmente dal cambio di prospettiva che le stesse hanno determinato nel modo di concepire il processo creativo. Analogamente, l'interazione con le AI indirizza verso una nuova ontologia del progetto di

tionship between the ideational process and the realization process, in which the designer acts on the code, digital genome, to be able to define and control the life cycle of architecture, within a parametric process. The exemplification of seven categories – Information, Interaction, Simulation, Optimization, Customization, Integration and Selection – analyzed and structured by G. Gallucci, completes the discussion, defining the elements of digital culture through which to provide an interpretation of Architecture design.

The third text *Architecture in the Age of Artificial Intelligence. An Introduction to AI for Architects*, Bloomsbury (2022), by Neil Leach is reviewed by Marina Rigillo<sup>3</sup>. The text examines how different manifestations of AI will affect the discipline and profession of architecture and how AI is already being used as a powerful design tool.

M. Rigillo addresses the pervasive nature of AI in architecture and the artistic imagination and highlights how it is conditioned by the uniqueness of ideational thinking, typified by Boden in the categories of *combinatorial, exploratory, and transformational creativity*. These, in turn, express forms of intelligence that are activated upon the emergence of novel conditions and demands: the terms *swarm intelligence, ambient intelligence* and *architectural intelligence* refer to the interaction between individual and collective behaviors, and the pressure produced by one or more agents of change. M. Rigillo highlights the hybrid nature of AI as the overcoming of the dualism between an artificial and a natural intelligence, which stems mainly from the change of perspective that AI have brought about in the way the creative process is conceived. Similarly, interac-

architettura, sempre più focalizzato sul design di processo rispetto a quello di prodotto.

I tre testi sopracitati evidenziano la necessità di cambiamento rispetto i processi ideologici e creativi della cultura architettonica. Di fatti, sia rispetto le applicazioni che attraverso la disamina dei processi metodologici, improntati sull'utilizzo di strumenti digitali, irrompe e si rafforza una nuova cultura del progetto architettonico. I tre testi, in modo trasversale, mostrano come le tecnologie digitali debbano considerarsi strumenti di forme di intelligenza collettiva non orientate al *problem-solving* ma funzionali a interpretare realtà mutevoli attraverso processi e strumenti responsivi, auto-regolativi e adattivi. L'impatto delle tecnologie dirompenti ed emergenti, utilizzate sul progetto dell'edificio e della città, definisce il passaggio da un'idea di architettura declinata al singolare, ad una produzione di opzioni definitivamente plurali in cui le tecnologie abilitanti, attraverso diversi strumenti di interazione, rappresentano i nuovi mezzi attraverso cui il progetto si evolve, si racconta, si propone, si ripensa, verso nuove ere e rivoluzioni digitali.

#### NOTE

<sup>1</sup> Maria Federica Ottone è Professore Ordinario di Progettazione ambientale presso Università degli studi di Camerino UNICAM, Scuola di Architettura di Ascoli Piceno.

<sup>2</sup> Serena Baiani è Professore Associato di Tecnologia dell'Architettura, presso il Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'architettura, Sapienza Roma.

<sup>3</sup> Marina Rigillo è Professore Associato di Tecnologia dell'Architettura, presso il Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II.

tion with AI directs toward a new ontology of architectural design, which is increasingly focused on process design as opposed to product design.

The above three texts highlight the need for change with respect to the ideological and creative processes of architectural culture. In fact, both with respect to applications and through the examination of methodological processes, marked by the use of digital tools, a new culture of architecture design bursts in and strengthens. Across the board, the three texts show how digital technologies should be seen as tools of collective forms of intelligence that are not *problem-solving* oriented but functional in interpreting changing realities through responsive, self-regulatory and adaptive processes and tools. The impact of disruptive and emerging technologies, used on the design of the building and the city,

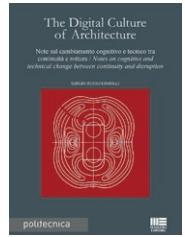
defines the shift from an idea of architecture declined in the singular, to a production of definitively plural options in which the enabling technologies, through different tools of interaction, represent the new means through which the project evolves, is told, is proposed, is rethought, toward new digital eras and revolutions.

#### NOTES

<sup>1</sup> Maria Federica Ottone is Full professor on Environmental Design at University of Camerino UNICAM, Faculty of Architecture of Ascoli Piceno.

<sup>2</sup> Serena Baiani is Associate Professor of Architectural Technology, Department of Planning, Design, Technology Of Architecture, Sapienza Roma.

<sup>3</sup> Marina Rigillo is Associate Professor of Architectural Technology at Department of Architecture, University of Napoli Federico II.



**Sergio Russo Ermolli**

***The Digital Culture of Architecture. Note sul cambiamento cognitivo e tecnico tra continuità e rottura / Notes on cognitive and technical change between continuity and disruption***

Maggioli, 2020

Lo scenario digitale permea il pensiero, la ricerca e la sperimentazione contemporanea, poiché caratterizzato da un approccio computazionale, aperto, ricorsivo e modulabile, capace di definire un percorso conoscitivo nella complessità inter e transdisciplinare che contraddistingue il processo di generazione del progetto dell'architettura. La sfida delle discipline del progetto, nell'attuale fase di transizione, è nella capacità di *incorporare nell'architettura* il livello complesso, interrelato, mutevole, estremamente dinamico del paradigma digitale, “cercando di produrre architettura che abbia una consapevolezza, quanto più possibile ampia, di essere parte del digitale”.

Sergio Russo Ermolli affronta in modo problematico il tema, esplorando con incisività il percorso evolutivo e ridefinendo criticamente il rapporto del digitale con il progetto, per coniugare l'affermazione “l'architettura digitale non esiste” di N. Leach, attraverso l'osservazione, su diversi livelli, del ruolo degli strumenti, delle metodologie e dei processi digitali nella nuova cultura tecnologica del progetto dell'architettura.

Il volume, articolato in due parti, pone la cultura digitale come paradigma, all'interno di un contesto di “cambiamento cognitivo e tecnico”, interrogandosi sul senso della Transizione verso un nuovo Cognitivismo, in cui Digitale e Cultura Materiale si allineano in una innovata *interazione*. Nello scenario contemporaneo in cui natura e artificio si combinano realizzando

The digital scenario permeates contemporary thought, research and experimentation, as it is characterised by a computational, open, recursive and modular approach, capable of defining a cognitive path in the inter- and trans-disciplinary complexity that characterises the process of generating the architecture project. The challenge of the design disciplines, in the current transitional phase, is in the ability to incorporate into architecture the complex, interrelated, changeable, extremely dynamic level of the digital paradigm, “trying to produce architecture that has the broadest possible awareness of being part of the digital”. Sergio Russo Ermolli tackles the topic in a problematic way, exploring the evolutionary path and critically redefining the relationship of the digital with the project, in order to confute N. Leach's statement “digital architecture

does not exist”, through the observation, on different dimensions, of the role of digital tools, methodologies and processes in the new technological culture of architectural design.

The book, divided into two parts, sets digital culture as a paradigm, within a context of “cognitive and technical change”, enquiring the meaning of the Transition towards a new Cognitivism, in which Digital and Material Culture are aligned in an innovative interaction. In the contemporary scenario, combining nature and artifice in unusual processes, Digital computation allows to “inform” material with specific characteristics that determine its biological, responsive and adaptive behaviour: the “immateriale” content qualifies new sets of technical properties, transforming products and components into digitised artefacts, interacting with the built environment.

inconsueti processi, la computazione digitale permette di “informare” il materiale con specifiche caratteristiche che ne determinano un comportamento biologico, responsivo e adattivo: il contenuto “immateriale” ne qualifica nuovi set di proprietà tecniche, trasformando prodotti e componenti in artefatti digitalizzati interagenti con l'ambiente costruito.

Affrontare il Digital Design – inclusivo, iterativo, induttivo, capace di fornire continui feedback al processo operativo e di dare priorità agli aspetti performativi – evidenzia la necessità di definire, attraverso l'analisi dei percorsi immateriali che hanno intessuto il Progetto, tra continuità e rottura, l'approccio contemporaneo delle Tecnologie del Progetto nei processi di materializzazione, in una aggiornata interpretazione delle *Information Technologies*. L'estensione della cultura tecnologica del progetto nella cultura digitale emerge, infatti, nel ruolo sostanziale che il pensiero sistematico attua all'interno della complessità delle scelte rispetto alla molteplicità degli strumenti, nella definizione di una dimensione progettuale in cui processi decisionali e metodi costruttivi si innovano coerentemente.

L'interpretazione del fenomeno in atto non è, infatti, nell'opposizione tra le categorie “Digitale” e “Analogico”, riduttiva perché esprime la transizione da un sistema manuale o meccanico verso uno *computerized*, in cui sono gli strumenti immateriali, più veloci e precisi, a prevalere sulla sequenza delle azioni meccaniche. Passaggio fondamentale nella trattazione è, infatti, l'individuazione – nello sviluppo di fasi differenti e di orizzonti tematici e operativi distinti, o a volte sovrapposti – della relazione tra Digitale e Architettura: dall'approccio prevalentemente strumentale dei dispositivi digitali, finalizzato a materializzare forme e superfici complesse; attraverso l'elaborazione di una

Dealing with Digital Design – inclusive, iterative, inductive, capable of providing continuous feedback to the operational process and prioritising performative aspects – highlights the need to define, analysing immaterial paths that have woven the Project between continuity and rupture, the contemporary approach of Technologies of the Project in the materialisation processes, in an updated interpretation of Information Technologies. The extension of technological culture of the project in the Digital Culture emerges, in fact, in the substantial role that the systemic thought implements within the complexity of choices with respect to the multiplicity of tools, in the definition of a design dimension in which decision-making processes and construction methods innovate coherently. The interpretation of the current phenomenon is not in the opposition

between the categories “Digital” and “Analogical”, reductive because it expresses the transition from a manual or mechanical system to a computerized one, in which immaterial tools, faster and more precise, prevail over the sequence of mechanical actions. A fundamental step in the discussion is, therefore, identification – in the development of different phases and distinct or sometimes overlapping thematic and operational horizons – of relationship between Digital and Architecture: from the predominantly instrumental approach of digital devices, aimed at materializing complex forms and surfaces; through the elaboration of a design practice, based on the theoretical-practical acquisition of computer tools, which leads to a “manipulation of form”; up to the acquisition of the awareness of the design instances and performative objectives that can be

prassi progettuale, basata sull'acquisizione teorico-pratica degli strumenti informatici, che porta ad una "manipolazione della forma"; fino all'acquisizione della consapevolezza delle istanze progettuali e degli obiettivi performativi associabili al digitale, orientata ad una concezione "scientifica" dello spazio architettonico, in cui possano confluire differenti modelli interpretativi dell'ambiente, della tecnica e della società.

Le nuove tecnologie digitali spostano il tema sulla centralità del pensiero più che degli strumenti, riorientando la ricerca progettuale verso la "nuova materialità dell'architettura", tra la completa astrazione e l'ultraconcreto, in una sperimentazione, anche morfologica, che utilizzi le simulazioni per ottimizzare i comportamenti di un sistema architettonico reattivo.

Il paradigma contemporaneo "digital minimal" ridefinisce, infine, il rapporto tra virtuale e reale, tra creatività e delega tecnologica, tra processo ideativo e processo realizzativo, in cui il progettista agisce sul codice, *genoma digitale*, per riuscire a definire e controllare, in modo responsabile, il ciclo di vita dell'architettura, all'interno di un processo parametrico.

L'integrazione tra progettazione, fabbricazione e costruzione, attraverso la continuità di flussi tra le diverse fasi, con un appoggio guidato da logiche digitali e informative, rappresenta la trasformazione operativa più evidente. Emerge in modo chiaro, nello sviluppo della trattazione, il ruolo fondamentale del Progetto nel contenere le azioni, potenzialmente fuorvianti, che il Digitale può determinare sui processi decisionali e realizzativi dell'architettura, in cui la dimensione tecnologica del progetto realizza la sintesi possibile tra capacità ideativa, coscienza tecnica e visione del futuro nei processi di trasformazione dell'ambiente costruito.

associated with the digital, oriented towards a "scientific" conception of architectural space, in which different interpretative models of the environment, technology and society can converge.

The new digital technologies shift the theme to the centrality of thought rather than of tools, reorienting design research towards the "new materiality of architecture", between complete abstraction and the ultra-concrete, in an experimentation, also morphological, that uses simulations to optimize the behaviour of a reactive architectural system.

Finally, the contemporary 'digital minimal' paradigm redefines the relationship between the virtual and the real, between creativity and technological delegation, between the ideational process and the realization process, in which the designer acts on the code, a

digital genome, to be able to responsibly define and control the life cycle of architecture, within a parametric process.

The integration of design, fabrication and construction, through the continuity of flows between the different phases, with an approach guided by digital and information logics, represents the most evident operational transformation. It clearly emerges, in the development of the discussion, the fundamental role of the Project in containing the actions, potentially misleading, that the Digital can determine on the decision-making and construction processes of architecture, in which the technological dimension of the project realises the possible synthesis between ideational capacity, technical consciousness and vision of the future in the transformation processes of the built environment.

Il senso del Digitale, sposta completamente il punto di vista dall'utilizzo di strumenti di progettazione o realizzazione e, evidenzia, la capacità del progettista di veicolare valori immateriali attraverso mezzi materiali, riconfigurando i processi, in base alle complesse istanze contemporanee. L'esemplificazione delle sette *categorie* emergenti nella contemporaneità – Informazione, Interazione, Simulazione, Ottimizzazione, Personalizzazione, Integrazione e Selezione – analizzate e strutturate da G. Galluccio, completa la trattazione, definendo gli elementi della cultura digitale attraverso i quali fornire un'interpretazione del *progetto digitale di architettura* capace di veicolare valori *immateriale* attraverso mezzi *materiali*.

«Nell'inarrestabile relazione evolutiva tra uomo e macchina, il Digitale deve rappresentare per il progettista una via per ripensare e interrogare i contenuti fondanti l'architettura – la materialità, la tectonica, la forma, il contesto, il suo essere a servizio dell'uomo – allo scopo di implementare la sua base di conoscenze e riesaminare i principi concettuali e le categorie epistemologiche del progetto, rinunciando a sradicare ciò che ci rende umani, attribuendo invece valore a quegli elementi della tecnologia capaci di rispettare e proteggere la nostra diversità», conclude l'autore, puntualizzando una consapevole e profonda posizione scientifica.

Serena Baiani  
<https://orcid.org/0000-0002-1975-3251>

The sense of Digital, completely shifts the point of view from the use of design or realisation tools and, highlights the skill of the designer to convey immaterial values through material means, reconfiguring the processes, according to the complex contemporary instances. The exemplification of the *seven categories* emerging in the contemporary scenario – Information, Interaction, Simulation, Optimization, Personalization, Integration and Selection – analysed and structured by G. Galluccio, completes the discussion, defining the elements of digital culture through which to provide an interpretation of *digital architectural design* conveying *immaterial* values through *material* tools.

“In the unstoppable evolutionary relationship between man and machine, the Digital must represent for the designer a way to rethink and question

Serena Baiani



Consuelo Nava

*Ipersostenibilità e tecnologie abilitanti. Teoria, metodo e progetto*

Aracne Editrice, 2019

Il libro di Consuelo Nava restituisce la complessità e la grande varietà di questioni sulle quali la nostra disciplina si sta da qualche tempo interrogando, e lo fa cercando di mettere ordine e tracciare un nuovo percorso con il quale la ricerca rivolta alle tecnologie per l'architettura e la città (ma più in generale alla disciplina stessa dell'architettura) si deve confrontare. Se si vuole sintetizzare in poche parole l'impressione che suscita ad un primo sguardo, potrebbe essere definito un libro ad "alta densità" di contenuti, non subito evidenti nell'indice impostato secondo un ordine rigorosamente consequenziale che parte da "Lezioni" (assunti teorici) riferiti alla ricerca disciplinare, "Applicazioni" e, ancora successivamente, in "Esercizi". Ma quando ti addentri nelle trattazioni all'interno dei sotto capitoli, l'attenzione si sposta con facilità sulle parole chiave evidenziate a lato del testo; sono parole che fanno capire la natura complessa della trattazione e che si ripetono più volte scorrendo via via i capitoli del libro, come a tracciare connessioni fra gli stessi e invogliare il lettore a tracciare un proprio percorso di lettura. E ancora, il ripetersi di alcune parole come – solo per citarne alcune – *metabolismo, ipersostenibilità, recycling* o aggettivi, come *adattivo, circolare, reversibile* compaiono per descrivere idee, progetti o azioni riferiti sia alla scala urbana che a quella dell'oggetto architettonico, dimostrando nello scorrere dei capitoli (se ancora ce ne fosse bisogno) la capacità della disciplina della Tecnologia dell'Architettura di costruire relazioni proficue con altre disci-

pline, per governare processi alle diverse scale progettuali. In questo senso l'approccio *total design* viene rivisto attualizzando il concetto di *architetto integrale* (Bonaccorso, 2019) coniato da Gustavo Giovannoni, che allora dava risposta alla necessità di controllare i nodi più importanti di passaggio tra il progetto e la realizzazione dell'opera, ossia il controllo del processo comprendendo tutte le figure, dall'ingegneria all'arredamento. Il *total design* consiste nel ritorno ad una *consapevolezza trasversale*, superando al contempo il ruolo demiurgico di una sola figura, l'architetto, e la separazione delle competenze disciplinari, e affidando ad un insieme di attori e di tecnologie abilitanti il compito di convergere in soluzioni condivise, riducendo i conflitti.

A partire da questa linea interpretativa, dalla lettura è possibile costruire un percorso facendo emergere temi che di volta in volta sembrano essere utili a comprendere le dinamiche di trasformazione dell'ambiente costruito, anche attraverso le esperienze progettuali ad esse legate. Cruciale infatti sembra essere il rapporto stabilito tra la parte teorica e la traduzione dei significati in pratiche progettuali avanzate e "abilitanti" come una condizione naturale e imprescindibile per ottenere un impatto positivo delle questioni poste. Dunque, mentre noi siamo solitamente abituati a considerare il rapporto teoria/prassi in modo dicotomico, al contrario qui si avverte l'urgenza dell'autrice di dare conto di quanta sostanza può essere celata dietro parole apparentemente distanti e ancora poco connesse con il mondo professionale e, in ultima analisi, con la vita quotidiana delle persone. Da questo punto di vista alcune pungenti battute di Franco la Cecla (La Cecla, 2008) riferite alle teorie di Rem Koolhaas, sembrano oggi molto adatte a far riflettere sull'incapa-

Consuelo Nava's book restores the complexity and wide variety of issues on which our discipline has been wondering for some time, trying to bring order and chart a new path dedicated to the study of technologies for architecture and the city (but more generally to the discipline of architecture itself), with which the world of research will have to relate.

To summarize in a few words the impression it elicits at first glance, it could be called a book with "high density" content, not immediately evident in the table of contents set in a strictly consequential order starting with "Lessons" (theoretical assumptions) referring to disciplinary research, "Applications" and, again later, in "Exercises". But as you delve into the body of the book, within the sub-chapters, your attention easily shifts to the key words highlighted at the side of the text; these

are words that hint at the complex nature of the topics covered; they are repeated again and again as you scroll through the chapters of the book, as if to draw connections between them and entice the reader to chart his or her own reading path.

And again, the repetition of certain words such as just to name a few – *metabolism, hypersustainability, recycling* or adjectives, such as *adaptive, circular, reversible* appear to describe ideas, projects or actions referring both to the urban scale and to the scale of the architectural object, demonstrating in the flow of the chapters (if there was still a need) the ability of the discipline of Architectural Technology to build fruitful relationships with other disciplines, to govern processes at different design scales.

In this sense, the *total design* approach is revised by actualizing the concept of

*integral architect* (Bonaccorso, 2019) coined by Gustavo Giovannoni (1873-1947), who in those times tried to give an answer to the need to control the most important transition nodes between the design and the realization of the work, that is, the control of the process by including all figures, from engineering to furniture.

Today, *total design* is about returning to a cross-disciplinary awareness, while overcoming the demiurgic role of a single figure, the architect, and the separation of disciplinary competencies, and entrusting a set of actors and enabling technologies to converge in shared solutions, reducing conflict.

Starting from this line of interpretation, it is possible to build a path from reading the book by bringing out themes that from time to time seem to be useful in understanding the dynamics of transformation of the built envi-

ronment, including through related design experiences.

Therefore, the relationship established between the theoretical part and the translation of meanings into advanced and "enabling" design practices seems to be crucial as a natural and unavoidable condition for achieving a positive impact of the questions posed.

The usual academic habit of viewing the theory/praxis relationship in a dichotomous way is belied here; on the contrary, the author's urgency to demonstrate how much substance can be concealed behind seemingly distant words that still have little connection to the professional world and, ultimately, to people's daily lives is found. From this point of view, some pungent comments by Franco la Cecla (La Cecla, 2008) referring to the theories of Rem Koolhaas, seem very apt today to make us reflect on the inability of

cità di molti teorici dell'architettura di individuare possibili vie di uscita ai grandi problemi che affliggono le città contemporanee, limitandosi ad un atteggiamento di semplici osservatori e utilizzando gli stessi problemi in una sorta rappresentazione estetica; «un'estetizzazione della catastrofe, un'estetizzazione del cinismo in fin dei conti?» (idem, p. 31).

Le trattazioni di Consuelo Nava sono al contrario tutt'altro che lasciate in sospensione e solo parzialmente affidate all'interpretazione del lettore; il suo approccio alle questioni è, per chi scrive, molto simile a quello di Eduardo Vittoria, capace cioè di vedere la tecnologia come fattore progettante e in grado di rispondere ai problemi delle persone, una strategia per contribuire a ridurre le diseguaglianze e aumentare il livello di consapevolezza, un modo per migliorare complessivamente la qualità della vita. Gli esempi di questo impegno «progettante» sono evidenti e, per citarne solo alcuni, riguardano metodologie e progetti per l'utilizzo razionale delle risorse energetiche, la mitigazione degli effetti del cambiamento climatico attraverso soluzioni per la gestione dell'acqua durante i fenomeni estremi, per la circolarità dei processi di trasformazione urbana e per i processi industriali, per l'organizzazione di pratiche di co-progettazione con le comunità con l'obiettivo di «abilitare» i cittadini alla condivisione di beni e servizi accessibili a tutti. In ultimo verrebbe da dire che si tratta di un libro provocatorio in quanto, pur essendo un testo su supporto tradizionale, ciò nonostante è consapevole di dover catturare un lettore abituato alla lettura su digitale e ad una ricerca in rete spesso condotta attraverso parole chiave o slogan, quale quella svolta dai giovani dottorandi e dagli studenti; a questi ultimi è stata offerta dall'autrice evidentemente l'occasione per addentrarsi nelle

many architectural theorists to identify possible ways out of the great problems that plague contemporary cities, limiting themselves to an attitude of mere observers and using the same problems in a kind of aesthetic representation; «an aestheticization of catastrophe, an aestheticization of cynicism after all?» (idem, p. 31).

Consuelo Nava's dissertations are, on the contrary, far from being left in suspension and only partially left to the reader's interpretation; her approach to the issues is, for the writer, very similar to that of Eduardo Vittoria, who is able to see technology as a designing factor that can respond to people's problems; a strategy to help reduce inequalities and raise the level of awareness; a way to improve the quality of life overall. The examples of this "designing" effort are obvious and, to name just a few, involve methodologies and projects for

the rational use of energy resources, mitigation of the effects of climate change through solutions for water management during extreme events, circularity of urban transformation processes and industrial processes, and the organization of co-design practices with communities with the aim of "enabling" citizens to share goods and services accessible to all.

In the end, it would come to be said that this is a provocative book because, although it is a text in a traditional paper form, it is nonetheless aware of having to capture a reader accustomed to reading on digital and to an online search often conducted through keywords or slogans, such as that carried out by young PhD candidates and students; the latter have evidently been offered by the author an opportunity to penetrate into the foundational questions and languages of the new vision

questioni fondative e nei linguaggi della nuova visione dell'architettura e del suo ruolo nella contemporaneità.

Dal punto di vista didattico molto si è detto sulla caduta del manuale come strumento formativo, in quanto definitivamente tramontata la pretesa di una esaustività delle questioni trattate al suo interno; si assiste poi alla sempre maggiore prevalenza dello strumento digitale nella didattica e nella ricerca, ormai acquisito dai giovani indipendentemente dai temi sui quali verte la ricerca stessa. Ad un «uso massivo del libro di testo come strumento di fruizione passiva e riproduttiva di conoscenze» prevale ormai sempre di più l'utilizzo di «una molteplicità di fonti, cartacee e digitali, [...] (per) stimolare gli studenti a confrontarsi con fonti multiple, coltivando allo stesso tempo l'abilità di esplorazione, critica e di rielaborazione» (Franchini, 2020). Allora ben venga un libro che offre al lettore la possibilità di muoversi liberamente e trarre da esso spunti e storie dalle quali partire per condurre il proprio percorso individuale e collettivo al tempo stesso.

Maria Federica Ottone  
<https://orcid.org/0000-0002-8454-8043>

#### REFERENCES

- Bonaccorso, G. (2019), «Gustavo Guiovannoni e l'architetto integrale», Bonaccorso G. and Moschini F. (Ed.) «Quaderni degli Atti», Accademia Nazionale di San Luca, Roma.
- La Cecla, F. (2008), *Contro l'architettura*, Bollati Boringhieri, Torino.
- Franchini, R. (2020) *Una crisi da non sprecare. L'educativo digitale prima, durante e dopo il Coronavirus*, Rassegna CNOS 2/2020.

of architecture and its role in contemporaneity.

From the educational point of view, much has been said about the decline of the textbook as an educational tool, as the claim of exhaustiveness of the issues covered within a single text has definitively waned; then there is the increasing prevalence of the digital tool in teaching and research, now acquired by young people regardless of the topics on which the research itself is concerned.

To a «massive use of the textbook as a tool for the passive and reproductive fruition of knowledge» now increasingly prevails the use of «a multiplicity of sources, paper and digital,...) (to) stimulate students to deal with multiple sources, while cultivating the ability to explore, critique and rework» (Franchini, 2020). So welcome a book that offers readers the opportunity to

move freely and draw from it inspirations and stories from which to conduct their own individual and collective journey at the same time.

Maria Federica Ottone



**Neil Leach**

**Architecture in the Age of Artificial Intelligence. An Introduction to AI for Architects**

Bloomsbury, 2022

Fortemente ancorato alla realtà del nostro agire quotidiano, e attento all'avanzare delle tecnologie digitali in tutti i campi del sapere, il libro di Neil Leach porta il focus sulla relazione tra pensiero creativo e intelligenza artificiale, con l'obiettivo di delineare gli elementi fondativi di quella che si annuncia essere una rivoluzione dei metodi di apprendimento e del fare architettura. L'Intelligenza Artificiale (AI) ha conquistato infatti spazi sempre più significativi del nostro modo di produrre conoscenza. Paragonata da Laech ad una specie aliena, super intelligente ed invisibile, l'AI si identifica oggi come una sorta di apparato protesico che "estende" l'esperienza cognitiva della specie umana attraverso dispositivi tecnici molteplici, estremamente adattabili agli stili di vita e alle esigenze individuali e collettive.

Già presenti in molte aree della vita domestica e sociale, le AI si affermano per il carattere pervasivo che ne distingue l'utilizzo, nonché per le strategie di marketing che ne sostengono la diffusione. Non fanno eccezione, in questo senso, il mondo dell'arte e dell'architettura, ma qui la natura euristica, propria dei processi creativi, impone un riposizionamento degli approssimi culturali e delle relazioni che ne regolano le logiche di apprendimento e di sviluppo. L'integrazione delle AI nell'architettura e nell'immaginario artistico è condizionata infatti dalla unicità del pensiero ideativo, tipizzato da Boden nelle categorie del *combinatorial, exploratory e transformational creativity*

Deeply rooted in our day by day reality, and aware of the advancement of digital technologies in all fields of knowledge, Neil Leach's book brings our attention to the relationship between creative thinking and the artificial intelligence, with the aim of outlining the founding elements of what is expected to be a revolution in both learning methods and architecture making. Artificial Intelligence (AI) has in fact gained more and more significant spaces in the way of we produce knowledge. Compared by Laech to an alien species, super-intelligent and invisible, AI can be identified as a sort of prosthetic apparatus that "extends" the human cognitive experience through multiple technical devices, all extremely adaptable to individual and collective lifestyles and needs.

Already present in many areas of family and social life, AI are featured by the

pervasive nature that distinguishes its use, as well as for the marketing strategies that boost its spread. In this sense, Art and Architecture are not an exception, but here the heuristic nature, typical of creative processes, imposes to re-position traditional approaches and relationships that regulate the logic of learning and development within their culture. The integration of AI in architecture and artistic imagination is dependent in fact by the uniqueness of ideational thought, typed by Boden in the categories of combinatorial, *exploratory and transformational creativity* (pp.77). These latter express forms of intelligence that are activated by profiling unprecedented conditions and demands: the terms *swarm intelligence, ambient intelligence and architectural intelligence* refer to the interaction between individual and collective behaviors, and to the pressure produced

(pp. 77). Queste, a loro volta, esprimono forme di intelligenza che si attivano al profilarsi di condizioni e richieste inedite: i termini *swarm intelligence, ambient intelligence e architectural intelligence* rimandano all'interazione tra comportamenti individuali e collettivi, e alla pressione prodotta da uno o più agenti di cambiamento. Si tratta, in particolare, di forme di intelligenza collettiva non orientate al *problem-solving* ma funzionali a interpretare realtà incrementali attraverso processi e strumenti responsivi, auto-regolativi e adattivi, possibili solo grazie al supporto delle AI. Un punto di vista, quello di Leach, che porta il dibattito (e l'attenzione del lettore) non tanto verso l'abilità di quest'ultime nel generare nuove configurazioni spaziali, quanto sulle possibilità di aumentare ed espandere la nostra immaginazione e la nostra creatività grazie all'introduzione di modalità cognitive aggiuntive.

Gli avanzamenti prodotti negli ultimi anni definiscono, dunque, un contesto di interazione uomo-macchina profondamente diverso dal passato: il dualismo sotteso alla contrapposizione tra un'intelligenza naturale e altra di origine artificiale è nei fatti già superato da un processo di ibridizzazione, che sempre di più ha saldato insieme esperienza virtuale e reale, realizzando le condizioni fattuali per una nuova cultura cibernetica. «*We are natural born cyborgs*», afferma provocatoriamente l'Autore, citando Andy Clark (pp. 8). E siamo naturalmente cyborg poiché dotati di cervelli plastici, geneticamente adattivi e in grado di metabolizzare l'innovazione tecnologica come parte integrante del nostro sviluppo cognitivo.

Del resto, la natura ibrida delle AI non deriva esclusivamente dalla qualità del rapporto uomo-macchina ma anche dal cambio di prospettiva che l'avvento delle stesse ha determina-

by one or more changing agents. These are forms of collective intelligence not oriented to *problem-solving* but aimed to explain incremental realities through responsive, self-regulatory and adaptive processes (and tools), that are conceivable only thanks to the support of AI. The Leach's point of view does not address the debate (and the attention of the reader) towards the ability of the latter to generate artificial thoughts, rather to the possibilities of increasing and expanding our imagination and creativity through the introduction of further cognitive modes. Therefore, the advances produced in recent years define a context of human-machine interaction that is profoundly different from the past: the dualism between natural and artificial intelligence is already overcome by a hybridization process, which has increasingly welded together virtual and real, realizing the

factual conditions for a new cybernetic culture. «*We are natural born cyborgs*», the Author says provocatively, quoting Andy Clark (pp. 8); and we are all naturally cyborg because we have plastic brains that are genetically adaptive and can metabolize technological innovation as an integral part of our cognitive development.

Moreover, the AI hybrid nature does not come from the quality of the human-machine relationship exclusively, but also from the change in perspective resulting from the way of conceiving the entire creative process. Artistic action, as well as architecture, enters into relationship with AI through a collective intelligence, in which the interaction of different agents – «ants, brains and softwares» (pp. 147) – provide “emerging” scenarios harbingers of an immense, and not typifiable, potential of images and meanings.

to nel modo di concepire il processo creativo. L'agire artistico, così come l'architettura, entra in relazione con le AI attraverso un pensiero collettivo, in cui l'interazione di agenti differenti – «ants, brains and softwares» (pp. 147) – è condizione per determinare scenari “emergenti” forieri di un immenso, e non tipizzabile, potenziale di immagini e significati. La generazione di nuove forme, come ad esempio quelle prodotte dal volo degli stormi al crepuscolo, si realizza per mezzo di un sistema di interazioni tra il pensiero umano e quello digitale, dando vita ad un insieme complesso e informale di configurazioni che si rivela secondo un andamento a-deterministico, ispirato dai principi di auto-regolazione e adattamento.

In questa prospettiva, l'immaginario artistico che scaturisce dall'interazione tra sensibilità umana e AI è espressione di processi cognitivi “specchio”, fortemente ancorati al funzionamento delle reti neurali e agli avanzamenti nel campo delle neuroscienze, in cui intelligenza umana ed artificiale dialogano secondo codici cognitivi programmati ad hoc, in funzione del contesto agente, delle richieste espresse e dei metodi cognitivi prescelti. La macchina restituisce, infatti, la logica e l'approccio critico sottesi all'input dei dati e del settaggio, agendo come veicolo di ispirazione per l'artista o l'architetto, di cui rivela la sensibilità, i sogni o le allucinazioni (pp. 85).

Analogamente, l'interazione con le AI indirizza verso una nuova ontologia del progetto di architettura, sempre più focalizzato sul design di processo rispetto a quello di prodotto. Le possibilità di lavorare attraverso processi di *sampling and searching* sposta l'azione creativa i processi di selezione e di input dati, prima ancora che verso gli *outcomes* attesi (pp. 132; pp. 133), portando gli aspetti di originalità e autorialità del progetto nella fase

The generation of new artistic forms, such as those produced by the flight of the flocks at dusk, is realized through systemic interactions between human and digital thinking, thus creating a various and informal set of configurations that is revealed according to a-deterministic trend, and is inspired by the principles of self-regulation and adaptation.

In this perspective, the imaginary arising from both human sensitivity and AI is an expression of specific cognitive processes, strongly dependent from the neural networks functioning. Here, human and artificial intelligence interact according to cognitive codes programmed ad hoc, according to the contextual agents, the expressed demands and the selected cognitive methods. The machine works according to the logic and critical approach given to data input and setting criteria.

The machine thus acts as a vehicle of inspiration for the artist or architect, whose sensitivity, dreams or hallucinations reveal themselves (pp. 85). Likewise, interaction with artificial intelligence points to a new ontology of architectural design, centered on process design rather than product design. The opportunities of working through *sampling and searching* processes shifts the creative action of the input processes, even before towards the expected outcomes (pp.132; pp. 133). In the definition phase of the constraints and conditions of setting, the aspects of originality and authorship of the project. This condition determines an important change in the role traditionally attributed to the architect, who becomes responsible for the information project underlying the intervention, the creator of a creative cognitive process aimed at generating multiple

preliminare di definizione dei vincoli e delle condizioni di settaggio. Questa condizione determina una modifica importante nel ruolo tradizionalmente attribuito all'architetto, che diventa responsabile del progetto informativo sotteso all'intervento, artefice di un processo cognitivo creativo finalizzato a generare soluzioni molteplici, tutte rispondenti ai criteri introdotti, ma ognuna diversamente in sintonia con la sensibilità e l'immaginario artistico del progettista. L'impatto delle AI sul progetto dell'edificio e della città definisce quindi, soprattutto, il passaggio da un'idea di architettura declinata al singolare, ad una produzione di opzioni definitivamente plurali.

Le conclusioni dell'Autore guardano allora alla combinazione tra AI e pensiero creativo come un essenziale luogo di sperimentazione, dove i progressi scientifici si saldano con i modelli di apprendimento, interagendo con i comportamenti individuali e collettivi che alimentano la città; un luogo aperto alle diverse percezioni del reale e foriero di nuove forme di abitare: «A new movement is emerging [...] We are calling this new movement Architectural Intelligence» (pp. 174).

Marina Rigillo

<https://orcid.org/0000-0003-4865-0961>

solutions, all meeting the criteria introduced, but each differently in tune with the sensitivity and artistic imagination of the designer. The impact of AI on the design of the building and the city therefore defines, above all, the transition from an idea of architecture declined in the singular, to a production of options definitely plural.

The author's conclusions then look at the combination of AI and creative thinking as an essential place of experimentation, where scientific advances are combined with learning models, interacting with the individual and collective behaviours that feed the city; a place open to different perceptions of the real and harbinger of new forms of living: «A new movement is emerging [...] We are calling this new movement Architectural Intelligence» (pp.174).

Marina Rigillo

a cura di/edited by Alessandro Claudi de Saint Mihiel, <https://orcid.org/0000-0002-4466-0508>

## Efficienza energetica e soluzioni tecniche di involucro massive

Alessandro Claudi de St. Mihiel,

Responsabile della Rubrica Innovazione e sviluppo industriale

L'attuale situazione geopolitica mondiale rende il principio dell'*Energy Efficiency First* un impegno strategico ineludibile oltre che di grande attualità che va nella direzione dello sviluppo sostenibile e dello scenario di *carbon neutrality* al 2050. Dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza emerge che per avviare la transizione ecologica è necessario ridurre drasticamente le emissioni di gas clima-alteranti in particolar modo migliorando l'efficienza energetica e conseguendo risparmi negli usi finali per l'intero comparto delle costruzioni.

È però opportuno non dimenticare che l'efficienza energetica è una leva che parte dal basso ed è trasversale a diversi settori economici. Ad esempio, la riqualificazione energetica degli edifici vedrebbe i suoi benefici indiretti di molto ridimensionati se non supportata da un efficientamento del comparto industriale ad essa associato. Il settore terziario, con le peculiarità dei compatti in esso inclusi, è interessato da interventi di riqualificazione e di efficientamento dei suoi processi produttivi.

Le scelte dei produttori nel settore dell'edilizia devono confrontarsi con l'innalzamento dei livelli di prestazione richiesti dal mercato che non si risolvono con i soli consumi energetici dell'edificio in fase d'uso, ma sono associati ad aspetti ambientali che caratterizzano l'intero processo edilizio (Carbonaro *et al.*, 2018).

Le strategie mirate al risparmio energetico in edilizia, promosse negli ultimi anni a livello europeo da enti di ricerca e di

normazione, hanno puntato principalmente sul contenimento delle dispersioni termiche. Ciò ha determinato una spinta all'"iperisolamento", privilegiando soluzioni costruttive all'interno delle quali l'efficienza energetica viene perseguita esclusivamente attraverso la progettazione di sistemi di involucro caratterizzati da livelli di trasmittanza particolarmente performanti. La ricerca di elevati livelli di isolamento termico delle chiusure ha di fatto privilegiato soluzioni connotate dall'impiego prevalente di materiali a bassa conducibilità termica, rendendo di pari passo marginale il riferimento a soluzioni costruttive le cui prestazioni dipendono dall'impiego di materiali caratterizzati da una consistente massa, che possono assicurare un efficace contributo al contenimento dei consumi energetici, oltre che eccellenti condizioni di comfort ambientale (Ferrari 2009).

Per rispondere alla richiesta di materiali e componenti per chiusure opache verticali ad alte prestazioni termiche al fine di migliorare l'efficienza energetica degli edifici di nuova realizzazione, i produttori di laterizio hanno già da diversi anni intrapreso politiche di sviluppo e miglioramento dei loro prodotti. Questa rincorsa alla ricerca dell'innovazione ha portato all'introduzione sul mercato di blocchi in laterizio di nuova generazione, le cui prestazioni termiche e acustiche nonché sismiche e di resistenza al fuoco sono state incrementate (Campioli *et al.*, 2012). Dall'analisi dei prodotti in laterizio oggi disponibili, emerge un processo di innovazione continuo al fine del miglioramento prestazionale; in particolare, per aumentare la resistenza termica dei blocchi sono state condotte sperimentazioni sulla conducibilità e densità dell'impasto, sulla percentuale di foratura e densità degli elementi, sulla geometria dei fori (nel rispetto dei vincoli dettati dalla normativa sismica, nel caso dei blocchi

## Energy efficiency and massive envelope solutions

The current global geopolitical situation makes the principle of Energy Efficiency First an unavoidable strategic commitment as well as highly topical going in the direction of sustainable development and a carbon neutrality scenario to 2050. The National Recovery and Resilience Plan shows that to start the ecological transition it is necessary to drastically reduce climate-altering gas emissions, especially by improving energy efficiency and achieving end-use savings for the entire construction sector.

However, it should not be forgotten that energy efficiency is a lever that starts from the bottom and cuts across several economic sectors. For example, the energy upgrading of buildings would see its indirect benefits greatly diminished if it were not supported by

an efficiency upgrading of the associated industrial sector. The tertiary sector, with the peculiarities of the sectors included in it, is affected by retraining and efficiency improvements in its production processes.

The choices of manufacturers in the building sector have to deal with the increase in performance levels required by the market, which are not resolved by the energy consumption of the building in use alone but are associated with environmental aspects that characterise the entire building process (Carbonaro *et al.*, 2018).

Strategies aimed at energy saving in buildings, promoted in recent years at a European level by research and standardisation bodies, have mainly focused on limiting heat loss. This has led to a push towards "over-insulation", favouring construction solutions in which energy efficiency is pursued

exclusively through the design of envelope systems characterised by particularly high-performance transmittance levels. The search for high levels of thermal insulation of the envelopes has in fact privileged solutions characterised by the prevalent use of materials with low thermal conductivity, making marginal reference to construction solutions whose performance depends on the use of materials characterised by a consistent mass, which can ensure an effective contribution to the reduction of energy consumption, as well as excellent conditions of environmental comfort (Ferrari 2009).

To meet the demand for materials and components for vertical opaque closures with high thermal performance to improve the energy efficiency of new buildings, brick manufacturers have for several years now been pursuing policies to develop and improve

their products. This pursuit of innovation has led to the introduction of new-generation brick blocks on the market, whose thermal and acoustic performance as well as seismic and fire resistance have been increased (Campioli *et al.*, 2012). In particular, in order to increase the thermal resistance of the blocks, experiments have been carried out on the conductivity and density of the mixture, on the percentage of perforation and density of the elements, on the geometry of the holes (in compliance with the constraints set by seismic regulations, in the case of load-bearing blocks), on the joints (made with thermal mortar or by cancelling them in the case of interlocking and rectified blocks), obtaining increasingly high-performance products and related technical solutions. In just a few decades, this 'metamorphosis' has transformed the solid brick into a

portanti), sui giunti (realizzati con malta termica o annullandoli nel caso dei blocchi a incastro e rettificati), ottenendo prodotti e relative soluzioni tecniche sempre più performanti. In pochi decenni questa "metamorfosi" ha trasformato il solido mattone pieno in un prodotto high-tech dal grande formato e dalle elevate prestazioni (Baratta *et al.*, 2018).

La tendenza dell'architettura contemporanea degli ultimi anni è principalmente orientata verso l'utilizzo di materiali ad elevate performance che contribuiscono sempre in maggiore misura a ridurre lo spessore e incrementare la trasparenza dell'involucro edilizio. Tuttavia, come accennato, una questione aperta e di particolare interesse è quella di ricorrere a materiali e sistemi costruttivi che dialogando con l'ambiente circostante, modulano la complessità e l'imprevedibilità del clima soprattutto nei regimi estivi. Questo obiettivo si raggiunge sia considerando le proprietà dinamiche dell'involucro edilizio, sia adottando materiali come il laterizio, che, grazie alle sue caratteristiche intrinseche, quali l'inerzia termica e la massa, si rivela una valida soluzione per le strategie passive di raffrescamento (Desiderio, 2022). Il ricorso alla soluzione massiva per gli edifici in clima mediterraneo può costituire, per la filiera delle costruzioni in laterizio, una delle opportunità per uscire dalla crisi e per competere con altri sistemi realizzativi – considerati più innovativi – come quelli che prevedono l'assemblaggio a secco.

L'utilizzo di involucri edilizi massivi, o meglio "capacitivi", cioè costituiti da materiali ad elevata capacità termica, consente nei climi mediterranei, specie se caratterizzati da un'ampia escursione termica giornaliera (circa 15°C) e quindi da una ventilazione notturna efficace, di ridurre il carico termico da raffresca-

high-performance, large-format high-tech product (Baratta *et al.*, 2018). The trend in contemporary architecture in recent years is mainly towards the use of high-performance materials that increasingly contribute to reducing the thickness and increasing the transparency of the building envelope. However, as mentioned, an open question of particular interest is that of using building materials and systems that dialogue with the surrounding environment, modulating the complexity and unpredictability of the climate, especially in summer regimes. This objective is achieved both by considering the dynamic properties of the building envelope and by adopting materials such as brick, which, thanks to its intrinsic characteristics such as thermal inertia and mass, proves to be a valid solution for passive cooling strategies (Desiderio, 2022). The use of the mass

solution for buildings in the Mediterranean climate can be one of the opportunities for the brick construction industry to emerge from the crisis and to compete with other construction systems – considered more innovative – such as those involving dry assembly. The use of massive, or rather "capacitive" building envelopes, i.e., made of materials with a high thermal capacity, makes it possible in Mediterranean climates, especially if they are characterised by a wide daily temperature range (about 15°C) and therefore by effective night ventilation, to reduce the thermal load from summer cooling by 10÷40% compared to the case of light envelopes, with the same insulating performance.

In fact, the vernacular architecture of the Mediterranean area has always favoured buildings with thick walls that, together with appropriate solar shad-

mento estivo del 10÷40% rispetto al caso di involucri leggeri, a parità di prestazioni isolanti.

L'architettura vernacolare dell'area mediterranea ha infatti da sempre privilegiato edifici con murature di grosso spessore che unitamente a opportuni sistemi di schermatura solare e di ventilazione naturale, consentono di ottenere buoni livelli di comfort ambientale estivo (Margani, 2012).

L'utilizzo di sistemi costruttivi in laterizio può svolgere un ruolo importante proprio nei climi mediterranei, laddove le performance di contenimento dei consumi energetici si debbono raffrontare principalmente con le tematiche del raffrescamento estivo, e nell'ambito dei centri urbani consolidati e con caratteristiche di pregio storico, in cui l'uso di tale materiale permette un migliore inserimento architettonico e paesistico degli edifici nuovi o ristrutturati.

Inoltre, un deciso impulso al recupero dei materiali di scarto e alla lavorazione di materie riciclate nel ciclo produttivo, potrebbe qualificare in senso ambientale i prodotti e le filiere locali in un'ottica di economia circolare.

In tale direzione vanno alcuni importanti ricerche, tra cui il progetto KeepCool II: *Transforming the market from "cooling" to "sustainable summer comfort"* che vede tra i principali partner l'end-use Efficiency Research Group (eERG) del Politecnico di Milano.

KeepCool-II approfondisce e promuove il concetto di "comfort estivo sostenibile", con l'obiettivo di garantire buone condizioni di comfort ambientale interno durante il periodo estivo senza ricorrere – o comunque ricorrendovi in minima parte – all'uso di fonti energetiche tradizionali. Tale risultato può essere raggiunto, ad esempio, attraverso il consolidamento del mercato

ing and natural ventilation systems, make it possible to provide good levels of summer environmental comfort (Margani, 2012).

The use of brick building systems can play an important role particularly in Mediterranean climates, where the performance of limiting energy consumption must be compared mainly with the issues of summer cooling, and in consolidated urban centres with characteristics of historical value, where the use of this material allows a better architectural and landscape integration of new or renovated buildings.

In addition, a decisive boost to the recovery of waste materials and the processing of recycled materials in the production cycle could qualify local products and supply chains in an environmental sense with a view to the circular economy.

Several important research projects are heading in this direction, including the KeepCool II: *Transforming the market from "cooling" to "sustainable summer comfort"* project, whose main partners include the End-Use Efficiency Research Group (eERG) of the Politecnico di Milano.

KeepCool-II deepens and promotes the concept of 'sustainable summer comfort', with the objective of guaranteeing good indoor environmental comfort conditions during the summer period without resorting – or at least minimally resorting – to the use of traditional energy sources. This result can be achieved, for example, through the consolidation of the market for passive and active solutions that guarantee summer comfort conditions in a sustainable manner, the definition of incentives that push designers towards integrated design, the introduc-

delle soluzioni passive e attive che garantiscono condizioni di comfort estivo in modo sostenibile, la definizione di incentivi che spingano i progettisti verso la progettazione integrata, l'introduzione e il consolidamento del concetto di comfort estivo sostenibile nei Piani di Azione nazionali sull'Efficienza Energetica, nelle linee guida per l'Amministrazione Pubblica e nei regolamenti edilizi nazionali.

In un'ottica di fattiva collaborazione tra enti di ricerca e imprese e al fine di innescare un trasferimento di conoscenze in termini di metodi e approcci all'innovazione, questo numero della Rubrica ha individuato quale qualificato interlocutore il Gruppo Ripa Bianca S.r.l, storica realtà operante nel settore dell'industria del laterizio. Nelle pagine seguenti l'arch. PhD student Jacopo Andreotti, attraverso un dialogo con l'Amministratore Delegato del Gruppo, dott. Michele Marconi, sviluppa alcuni ragionamenti sulle tematiche delineate in premessa e pertinenti al *know how* dell'azienda.

### **L'innovazione nel settore industriale dei laterizi come strumento di tutela ambientale ed efficientamento energetico: il Gruppo Ripa Bianca**

Jacopo Andreotti,

Dipartimento di Architettura, Università degli Studi Roma Tre

**Jacopo Andreotti:** *In questa intervista vorrei discutere sulle opportunità che le pratiche circolari possono innescare sul settore dei laterizi. Oggi più che mai la tua categoria, come anche quella del cemento, dell'acciaio e del vetro, è colpita dalla crisi. Emerge*

tion and consolidation of the concept of sustainable summer comfort in the National Action Plans on Energy Efficiency, in the guidelines for Public Administration and in national building regulations.

With a view to effective collaboration between research organisations and companies, and to trigger a transfer of knowledge in terms of methods and approaches to innovation, this issue of the Journal has identified Gruppo Ripa Bianca S.r.l, a historical company operating in the brick industry, as a qualified interlocutor. In the following pages the arch. PhD student Jacopo Andreotti, through a dialogue with the Group's Managing Director, Dr. Michele Marconi, develops some thoughts on the issues outlined in the introduction and relevant to the company's know-how.

**Innovation in the brick industry as environmental protection and energy efficiency tool: the Ripa Bianca Group**

**Jacopo Andreotti:** *In this interview, I would like to discuss the opportunities that circular practices can trigger in the brick industry. Today more than ever, your category, as well as cement, steel, and glass, is struck by the crisis. Therefore, it is necessary to rethink how to make products by adopting strategies to optimise the use of resources and the efficiency of the production system. So, what has been the brick sector's trend over the last few years?*

**Michele Marconi:** Over the past fourteen years, the brick sector has suffered a sharp drop in terms of production volume and number of production plants. Analyzing the annual reports drawn up by the brick division of the Confindustria Ceramics Observatory,

*pertanto la necessità di ripensare al modo in cui si realizzano i prodotti, adottando strategie di ottimizzazione dell'uso delle risorse ed efficientamento del sistema produttivo. Qual è dunque l'andamento del settore dei laterizi in questi ultimi anni?*

**Michele Marconi:** Il settore dei laterizi ha subito, nel corso degli ultimi quattordici anni, un drastico calo in termini di volume di produzione e, di conseguenza, di numero di impianti produttivi. Analizzando i report annuali elaborati dall'osservatorio di Confindustria Ceramica (divisione laterizi), la crisi economica insorta nel 2008, i cui effetti hanno avuto ripercussioni fino al 2018, ha drasticamente diminuito la produzione e costretto alla chiusura diversi stabilimenti. Se il 2019 è stato caratterizzato da una certa stabilità nei volumi di prodotto, la pandemia scoppiata a inizio 2020 ha ulteriormente acuito le problematiche del settore. La successiva crescita registrata per il 2021, riconducibile anche alle agevolazioni fiscali introdotte dal Superbonus, è stata in buona parte vanificata dall'esponenziale incremento dei costi energetici e delle materie prime a causa del conflitto tra la Russia e l'Ucraina. Più precisamente, se si analizzano i dati elaborati dall'*InterContinental Exchange* per il biennio 2020-2022 sul *Title Transfer Facility* (TTF) – ovvero l'indice di borsa del gas naturale al mercato dei Paesi Bassi – si evidenzia un incremento superiore al 700%: passando da un costo di circa 15 euro/MW a novembre 2020 a 125 euro/MW a novembre 2022; situazione che purtroppo sembra destinata a perdurare nel tempo.

Per superare questo lungo periodo di difficoltà è indispensabile agire con una visione strategica, votata all'efficientamento del sistema produttivo in tutti i suoi aspetti. È infatti necessario agire sulla riduzione dei fabbisogni energetici, così come sulla

the economic crisis that occurred in 2008, whose effects had repercussions until 2018, has drastically decreased production and forced several plants to close. While 2019 has been characterized by specific stability in product volumes, the pandemic in early 2020 has further exacerbated the sector's problem. The following rise recorded for 2021, also attributable to the tax breaks introduced by the *Superbonus*, was primarily frustrated by the exponential increase in energy and raw materials costs due to the conflict between Russia and Ukraine.

More in detail, if you analyze the data processed by the *InterContinental Exchange* for the two years 2020-2022 in the *Title Transfer Facility* (TTF) – the natural gas stock index in the Netherlands market – there is a rise in the cost of the natural gas above 700%: from a cost of around 15 euro/MW in No-

vember 2020 to 125 euro/MW in November 2022; a situation that unfortunately seems to be destined to continue over time. It is essential – to overcome the long period of difficulty – to operate with a strategic vision devoted to the efficiency of the production system in all its aspects.

It is indeed necessary to act on the reduction of energy demands, as well as on the decrease in the consumption of natural raw materials, by paying great attention to the reuse of by-products and the recovery of waste, thereby containing greenhouse gas emissions. The brick industry must be ready to intercept the future opportunities that will come from the PNRR's investments but also from the potential benefits from the *Green Public Procurement* (GPP) – in Italian *Criteri Ambientali Minimi* (CAM) – and the new *End-of-Waste* directives (Decree



diminuzione del consumo di materie prime naturali prestando grande attenzione al recupero di sottoprodotto e riutilizzo di materiali recuperabili, puntando inoltre al contenimento delle emissioni di gas serra. L'industria dei laterizi deve dimostrarsi pronta a intercettare le future opportunità che deriveranno dagli investimenti del PNRR ma, altresì, anche i potenziali benefici derivanti dai Criteri Ambientali Minimi (CAM) e dalle nuove direttive sull'*End of Waste* (Decreto 15 luglio 2022) predisposte per i rifiuti da Costruzione e Demolizione. Tutti questi strumenti devono rappresentare un *driver* di ricerca e sviluppo di nuove soluzioni di prodotto e di processo.

**J.A.: Ridurre il consumo di risorse energetiche e materiche è indubbiamente una delle principali sfide che l'intero settore delle costruzioni deve affrontare in questi anni, tenendo presente che i piani di sviluppo della comunità europea intendono azzerare le emissioni di anidride carbonica entro il 2050. Se da un lato è noto che il settore dei laterizi necessiti di grandi quantitativi di metano per il funzionamento dei forni, dall'altro i prodotti in laterizio rispondono già ad alcuni principi di economia circolare. In questo complesso scenario, il Gruppo Ripa Bianca quali strategie tecniche e commerciali ha messo in atto per rimanere competitiva sul mercato?**

**M.M.:** In questo momento, in cui la crisi energetica e materica e la tutela dell'ambiente sono emergenze mondiali, la sfida per il comparto dei laterizi è quella di realizzare prodotti performanti e duraturi, capaci di ridurre i fabbisogni di risorse. In questo senso, il Gruppo Ripa Bianca investe costantemente nell'ottimizzazione del sistema produttivo. Dal punto di vista energetico, l'azienda è dotata di un innovativo forno con solo

bruciatori laterali ad alto rendimento, che emula i forni a rullo per la cottura dei prodotti ceramici. Questa innovazione di processo, a fronte di una minore densità di carica sui carri del forno, consente di distribuire uniformemente il calore e ottimizzare il processo di cottura, con un conseguente risparmio di gas metano e miglioramento della qualità del materiale. Inoltre, analogamente ad altri stabilimenti produttivi, il calore generato dal forno viene recuperato per svolgere le operazioni di essiccazione e preparazione alla cottura. Tali innovazioni di processo consentono all'azienda anche una maggiore flessibilità di produzione, stabilizzando il flusso di gas e riducendone i consumi, garantendo così continuità produttiva durante tutto il corso dell'anno. L'azienda è poi impegnata nella transizione verso fonti energetiche rinnovabili e ha da poco messo in funzione un impianto fotovoltaico da 215 kWp, ad integrazione di un precedente impianto da 50 kWp.

Per quanto attiene il materiale, il Gruppo Ripa Bianca mette a disposizione differenti tipi di prodotto per murature portanti e pareti interne e di tamponamento, dai laterizi tradizionali alle soluzioni a isolamento diffuso ad alte prestazioni termo-acusti-

15 July 2022) set up for Construction and Demolition waste. All these tools must drive the research and the development of new products and process solutions.

**J.A.: Decreasing the consumption of energy and material resources is undoubtedly one of the main challenges facing the construction sector in recent years, bearing in mind that the European Community's development plans aim to reduce carbon dioxide emissions to zero by 2050. On the one hand, it is known that the brick sector needs large quantities of natural gas for kiln operations; on the other hand, brick products already meet certain circular economy principles. In this complex scenario, what technical and commercial strategies have the Ripa Bianca Group deployed to remain competitive in the market?**

**M.M.:** At this time, when the energy

and material crisis and also the protection of the environment are global emergencies, the challenge for the brick industry is to manufacture high-performance and long-lasting products capable of reducing resource demands. In this sense, the Ripa Bianca Group constantly invests in optimising the production system. From an energy point of view, the company has developed and adopted an innovative kiln with only high-performance side burners, which emulates roller kilns for firing ceramic products.

This process innovation, in exchange for a lower charge density on the kiln wagons, allows for evenly distributing of the heat and optimising the firing process, resulting in natural gas savings and material quality improvements. In addition, like other production plants, the heat generated by the kiln is recovered for drying and

pre-heating operations. These process innovations also allow the company greater production flexibility by stabilising the gas flow and reducing its consumption, thus ensuring production continuity throughout the year. The company is then engaged in the transition to renewable energy sources and has recently put into operation a 215-kWh photovoltaic plant, integrating a previous 50-kWh plant.

Regarding the material, the Ripa Bianca Group offers different types of products for load-bearing walls, internal walls, and infill walls, from traditional bricks to diffuse-insulation solutions with high thermal-acoustic performance, but also bricks and prefabricated brick-cement solutions for the floor.

All brick products have a fraction of by-products and non-hazardous recoverable waste. In addition to the ordi-

nary foundry sand, the mixtures meld water treatment sludge taken from water basins adjacent to the company and other by-products used as pore agents. Although all the products manufactured by the company already meet the requirements imposed by CAM and further sector standards, there is perpetual attention to seeking out some new working mixtures that allow an improvement of the product's quality and environmental performances to realise high-performance and long-lasting products that respect the environment and the quality of living.

Long-lasting products – meant as the maintenance of the performance over time – and the extension of the life cycle of matter are two fundamental principles of the circular economy. In this sense, the studies carried out by Tiles & Bricks Europe (TBE) have shown that the average life cycle of

che, a cui si associano anche i laterizi e le soluzioni prefabbricate in laterocemento per solai.

Tutti i prodotti in laterizio sono realizzati con una quota parte di sottoprodotto e rifiuti recuperabili non pericolosi. Alle comuni terre e sabbie di fonderia sono stati associati fanghi di potabilizzazione delle acque, prelevati da bacini d'acqua limitrofi all'azienda, e altri sottoprodotto impiegati come additivi porizzanti. Sebbene i prodotti realizzati dall'azienda rispondano ai requisiti imposti dai CAM e dalle vigenti norme di settore, vi è una continua attenzione nel ricercare nuove miscele di lavorazione che consentano un miglioramento della qualità del prodotto e delle performance ambientali con l'obiettivo di realizzare prodotti performanti, duraturi e nel rispetto dell'ambiente e della qualità dell'abitare. Proprio la durabilità, intesa come mantenimento delle prestazioni nel tempo, e l'estensione del ciclo di vita della materia sono due principi fondamentali dell'economia circolare. In questo senso, gli studi condotti da *Tiles & Bricks Europe* (TBE) hanno dimostrato come il ciclo di vita medio del laterizio sia di circa 150 anni, decisamente superiore ad altri prodotti da costruzione. Pertanto, l'impiego di soluzioni in laterizio non dev'essere ritenuto obsoleto ma, bensì, una valida opzione per perseguire la sostenibilità dei manufatti edilizi.

**J.A.:** Come avviene la ricerca tecnologica nell'industria del laterizio e in che modo le attività di ricerca e sviluppo del Gruppo Ripa Bianca contribuiscono agli obiettivi di innovazione industriale? Quali sono infine gli indirizzi di ricerca che state affrontando o che pensate di affrontare nell'immediato futuro?

**M.M.:** La ricerca tecnologica nel settore dei laterizi richiede un impegno programmatico, caratterizzato da esperienze di ricer-

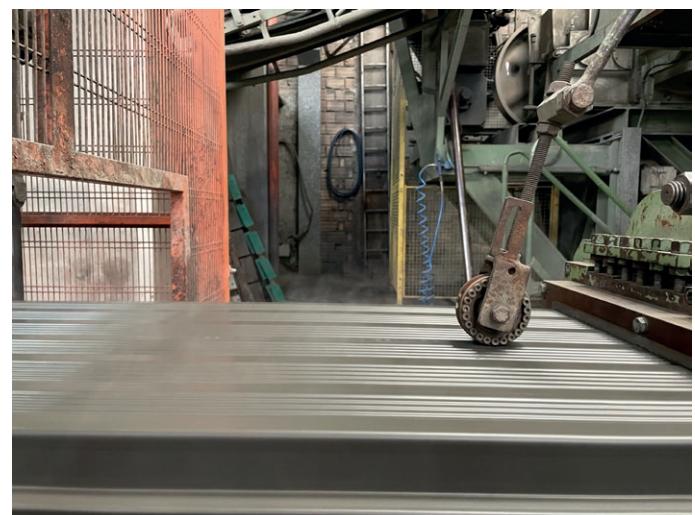
brick is about 150 years, significantly longer than other construction products. Therefore, the use of brick solutions should not be considered obsolete but a valid option to pursue the sustainability of buildings.

**J.A.:** How does technological research take place within the brick industry, and how do the research and development activities of the Ripa Bianca Group contribute to industrial innovation goals? Finally, what are the areas of research that the company is facing or that it plans to meet soon?

**M.M.:** Technological research in the brick sector requires a programmatic commitment characterised by long-term research experiences. As a result, the Ripa Bianca Group has launched – in recent years – collaborative activities with Italian research centres and universities.

Over the years, for instance, the Ripa Bianca Group has collaborated with the innovative startup Sfridoo s.r.l., which has identified the circular economy as its corporate mission. More recently, the company has established a synergic experience with the University of Roma Tre, which has allowed starting of a doctoral research programme to optimise the Ripa Bianca Group's resource management system and identify possible process, product, and procedure innovations.

In this context, the company's approach to research involves close collaboration with different "actors", be they universities, research centres or other companies. This strategy encourages technology and know-how transfer, both valuable tools for enhancing and making the industry competitive. From the applied research point of view, the Ripa Bianca Group is working



ca a lungo termine. Di conseguenza, il Gruppo Ripa Bianca ha dato avvio negli ultimi anni ad attività di collaborazione con centri di ricerca e università italiane.

Da anni, ad esempio, il Gruppo Ripa Bianca collabora con la startup innovativa Sfridoo s.r.l., che ha individuato nell'economia circolare la propria *mission* aziendale; più di recente è stata avviata una sinergia con l'Università degli Studi Roma Tre che ha dato modo di cominciare un percorso di ricerca dottorale votato all'ottimizzazione del sistema di gestione delle risorse del Gruppo Ripa Bianca e all'individuazione di possibili innovazioni di processo, prodotto e procedimento.

In questo senso, l'approccio alla ricerca del Gruppo Ripa Bianca passa attraverso una stretta collaborazione con "attori" differenti, siano essi università, centri di ricerca o altre aziende. Tale strategia incentiva il trasferimento tecnologico e di *know-how*, due utili strumenti di valorizzazione e competitività dell'industria.

Dal punto di vista della ricerca applicata, il Gruppo Ripa Bianca sta lavorando su più fronti con l'obiettivo di innovare e rendere sostenibile il sistema prodotto aziendale. Stiamo esplorare

on several areas to innovate and make the company's production system sustainable. The company is exploring the application of new technologies to the production processes, including artificial intelligence – as a tool to predict the possible performance responses of new products – and alternative energy sources to replace a portion of natural gas with biogas. Furthermore, regarding the products, the company is inquiring about the application of by-products and recovery materials to replace a part of the pure clay and new additives to reduce the kiln firing temperature. Finally, by intercepting the circular policies and the End of Waste's directives, the company intends to experiment with new product solutions made from post-consumer bricks. To sum up, the Ripa Bianca Group is tackling the period of crisis and transition with a proactive spirit, pursuing

sustainability through a synergic collaboration with the territory and the "actors" that populate it. Such interactions may provide the basis for the innovation of the brick industry.

do l'applicazione di nuove tecnologie al processo produttivo, tra cui l'intelligenza artificiale, come strumento per prevedere le possibili risposte prestazionali dei nuovi prodotti e le fonti energetiche alternative per sostituire una frazione di metano con il biogas. Inoltre, per quanto attiene il prodotto, l'azienda sta indagando l'applicazione di sottoprodotto e materiali di recupero in sostituzione dell'argilla vergine e nuovi additivi per ridurre la temperatura di cottura del forno. Infine, intercettando le politiche circolari e le direttive sull'*End of Waste*, intendiamo sperimentare nuove soluzioni di prodotto a partire dal laterizio post-consumo.

In conclusione, il Gruppo Ripa Bianca sta affrontando il periodo di crisi e di transizione con spirito propositivo, perseguidendo la sostenibilità mediante una collaborazione sinergica con il territorio e gli "attori" che lo popolano. Tali interazioni possono costituire di fatto le basi per l'innovazione del settore industriale dei laterizi.

#### REFERENCES

- Baratta, L., Calcagnini, L., Magarò, A. and Piferi C. (2018), "Manufatti in laterizio con isolamento diffuso ad alte prestazioni termo- acustiche", *Costruire in Laterizio*, n. 175.
- Campioli, A., Lavagna, M., Masperi, A. and Panella P. (2012), "Le prestazioni di involucri realizzati con blocchi evoluti", *Costruire in Laterizio*, n. 145.
- Carbonaro, C., Tedesco, S. and Fanucci, S. (2018), "Block\_Plaster: involucro in laterizio a elevate prestazioni energetico-ambientali", *Journal of Technology for Architecture and Environment*, n. 16, Firenze University Press.
- Margani, G. (2012), "Murature massive e comfort sostenibile in clima mediterraneo", *Costruire in Laterizio*, n. 137.
- Desiderio, D. (2022), "Involucro edilizio in terracotta: un'ottima soluzione per combattere la crisi energetica", in *ingenio-web* del 9.9.2022.
- Ferrari, S. (2009), *Il fattore tempo nella gestione dei flussi termici e il ruolo della massa*, in Campioli, A., Lavagna, M., (Eds.), *Raccomandazioni per la progettazione di edifici energeticamente efficienti*, Edizioni Laterservice, Roma.





