

SMART CONSTRUCTION OBJECT Strumenti per riprogrammare la città

SMART CONSTRUCTION OBJECTS Tools for reprogramming the city

Riccardo Pollo, Matteo Giovanardi, Matteo Trane

ABSTRACT

L'attenzione al tema della Smart City nella transizione verso modelli di sviluppo circolari deriva dal suo potenziale relativo al governo di fenomeni e processi sempre più complessi. Le informazioni prodotte dalle tecnologie ICT, introducendo approcci di tipo data-driven, consentono di 'riprogrammare' il funzionamento del sistema urbano, quale ecosistema complesso in cui materia ed energia si trasformano di continuo. A partire dall'analisi di esperienze di ricerca condotte a livello europeo, il contributo intende far emergere potenzialità e barriere legate agli Smart Construction Object. L'integrazione tecnologica-digitale, l'uso dei dati e l'affermarsi di nuovi modelli economici gestionali basati sui servizi vengono indagati in riferimento ai sistemi di facciata, quali componenti capaci di generare e condividere informazioni in grado di regolare input e output del sistema metabolico urbano.

The focus on the concept of Smart Cities in the shift towards circular development models derives from the ability to govern increasingly complex phenomena and processes. By introducing data-driven approaches, the information produced by ICT technologies allows us to 'reprogram' the functioning of the urban system, as a complex ecosystem in which matter and energy are continuously transformed. Starting from the analysis of research experiences carried out at the European level, this paper aims to explore potential and real barriers related to Smart Construction Objects in urban processes. Technological-digital integration, the use of data, and the emergence of new economic management models based on services are investigated with reference to façade systems, as components able to generate and share information to govern the input and output of the urban metabolic system.

KEYWORDS

IoT, processo edilizio, metabolismo urbano, componenti edilizi intelligenti, facciate intelligenti

IoT, building process, urban metabolism, smart construction object, smart façade

Riccardo Pollo, Architect and PhD, is an Associate Professor in Architectural Technology at the Interuniversity Department of Regional and Urban Studies and Planning (DIST), Politecnico di Torino (Italy). His research activity concerns sustainable architectural and urban design, architectural design management and quality. Mob. +39 348/97.92.428 | E-mail: riccardo.pollo@polito.it

Matteo Giovanardi, Architect, is a PhD student at the Department of Management, Production and Design (DIGEP), Politecnico di Torino (Italy). He carries out research in the field of IoT technologies in the building process investigating the integration of digital enabling technologies in innovative façade systems. Mob. +39 339/60.10.339 | E-mail: matteo.giovanardi@polito.it

Matteo Trane is a PhD student at the Interuniversity Department of Regional and Urban Studies and Planning (DIST), Politecnico di Torino (Italy). He carries out research in the field of environmental design and SDGs achievement, with a focus on topics related to microclimate modelling and simulation, and urban metabolism. Mob. +39 347/67.18.481 | E-mail: matteo.trane@polito.it

Hyperhabitat – Reprogramming the World: era questo il nome scelto per l'installazione curata da Vicente Guallart per la XI Mostra Internazionale di Architettura della Biennale di Venezia (2008), che esplorava il potenziale dell'Information Technology (IT) nel 'riorganizzare' il mondo, dalla scala del singolo oggetto a quella globale (Figg. 1, 2). Si trattava, dunque, di prefigurare una realtà 'ibrida', in cui la sfera del mondo fisico sarebbe stata interamente riprogrammata secondo i principi di una rete virtuale (Guallart Architects, 2008). In altri termini, l'idea era quella di definire una struttura multiscalare in grado di collegare qualsiasi elemento attraverso un'entità digitale, capace di identificare e infine stabilire nuovi sistemi relazionali. In questa prospettiva, l'utilizzo delle reti e delle tecnologie dell'informazione avrebbe costituito l'opportunità per ristabilire gerarchie, connessioni e rapporti tra gli elementi dell'ambiente costruito, l'ambiente naturale e l'uomo.

A distanza di oltre un decennio, la 'provocazione' dell'architetto e urbanista spagnolo possiede ancora i caratteri della dimensione futura. Ad ogni modo, alcune esperienze virtuose legate alla gestione delle reti di servizi in ambito urbano si iniziano ad intravedere nell'ambito dei progetti di Smart City (SC). Il concetto di SC si configura infatti quale risposta tecnologica, organizzativa, gestionale ed etica in grado di rispondere alle sfide poste dal mutevole contesto ambientale, sociale ed economico. L'attributo 'smart' associato al concetto di 'città' conferma il ruolo centrale del dato nella gestione dei processi urbani, inteso non solo come elemento conoscitivo per la progettazione urbana, ma come informazione diffusa e accessibile su elementi, infrastrutture e luoghi della città stessa (Losasso, 2015). L'ibridazione in corso tra tecnologie ICT e 'città di pietra' produce asset urbani molto diversi da quelli che la storia ci ha consegnato (Faroldi, 2018), all'interno dei quali la presenza diffusa delle reti informative – nuovo paradigma dell'hyperhabitat urbano – promuove processi basati su relazioni peer-to-peer volte a creare nuove strutture e relazioni multiscalarie (Guallart Architects, 2008). Nell'alveo della visione hyperhabitat si inserisce anche l'approccio legato alla Self Sufficient City (Guallart, 2010), che associa lo scambio di informazioni a scala globale con la produzione locale dei beni, in una città in cui sia possibile produrre risorse, lavorare, vivere a livello locale pur rimanendo connessi a livello globale.

La capacità di produrre e rielaborare una grande mole di dati per migliorare l'efficienza dei servizi, le modalità d'uso e la competitività economica dell'intero sistema portano a concepire la città come un insieme di istanze misurabili e in stretta relazione reciproca. Tale fenomeno, ascrivibile al concetto di 'datification' (Mayer-Schöenberger and Cukier, 2013), comporta la codifica in dato – e, dunque, informazione – di molti aspetti della nostra vita, cui è attribuibile un valore. Si prefigura così l'idea di una città in cui Pubbliche Amministrazioni, gestori e progettisti siano in grado di riprogrammare costantemente il funzionamento sulla base dei dati raccolti e rielaborati in real-time grazie ad algoritmi matematici avanzati. La SC si incardina oggi su un'intelligenza ambientale (Ratti and Claudel, 2017)

capace di ottimizzare/contrarre input e output di processi complessi, tra i quali la gestione dei rifiuti, la fornitura energetica o la mobilità. Ipotizzando una diffusione capillare delle reti è infatti possibile prefigurare la modellazione di un Metabolismo Urbano Smart (Shahrokni, Lazarevic and Brandt, 2015) per il governo delle città attraverso il monitoraggio continuo dei flussi di materia, energia e informazione (Pollo, Trane and Giovanardi, 2021). In questo contesto la città e ogni sua parte diventano dunque potenziali generatori di informazioni, in una logica in cui ogni edificio costituisce un nodo di un network globale (Rifkin, 2019). Come in un sistema interrelato e connesso, la SC necessita pertanto di una struttura capillare e diffusa sul territorio, quale primo livello di conoscenza necessario alla comprensione dei fenomeni in atto (Fig. 3).

Il contributo affronta il tema del cambiamento generato dalle tecnologie ICT nel settore delle costruzioni al fine di promuovere approcci nuovi, in linea con i principi dell'Economia Circolare, mirati alla creazione di un modello conoscitivo diffuso di Metabolismo Urbano. In particolare, all'interno del perimetro applicativo e concettuale della SC si intende far emergere il ruolo potenziale dell'informazione prodotta da componenti edilizi intelligenti. A partire, infatti, dalla relazione tra Internet of Things (IoT) e Smart Construction Object (SCO), l'articolo indaga i benefici attivabili dall'introduzione delle logiche di Product As a Service nei sistemi di facciata, quali componenti strategici nella regolazione dei flussi di energia e materia del sistema edilizio, nonché urbano.

Smart Construction Objects | L'evoluzione delle SC è abilitata da Smart Building (SB) e SCO, quali integrazione tra conoscenze scientifiche e tecnologiche contemporanee, nonché trasposizione dell'IoT nel sistema edilizio. In particolare, gli SCO vengono definiti come materiali, strumenti, dispositivi, componenti o strutture capaci di rilevare, elaborare e condividere informazioni in modo che abbiano autonomia e consapevolezza e possano interagire tra loro al fine di consentire all'utente un migliore processo decisionale (Niu et alii, 2016). Il loro funzionamento, basato anch'esso su un uso attivo e pervasivo delle tecnologie ICT, sfrutta l'intelligenza portata dall'IoT per offrire agli utenti nuove funzioni, servizi e modi di interazione. Al tempo stesso, l'introduzione della componente immateriale all'interno del sistema edificio ne modifica le modalità progettuali e di gestione, prefigurando una diversificazione formale e prestazionale. Le applicazioni in questo contesto, seppur ancora in fase sperimentale, hanno evidenziato come la capacità di un oggetto fisico di produrre e condividere informazioni sul nostro vissuto o sul suo funzionamento possa generare nel lungo periodo profitti superiori al suo stesso valore (Ciribini, 2019). Il loro campo di applicazione, così come confermato dalle esperienze in corso, è vasto ed in parte ancora inesplorato, ma promette ricadute dirette sul ruolo che i diversi stakeholder rivestono nella gestione del processo edilizio (Niu et alii, 2016).

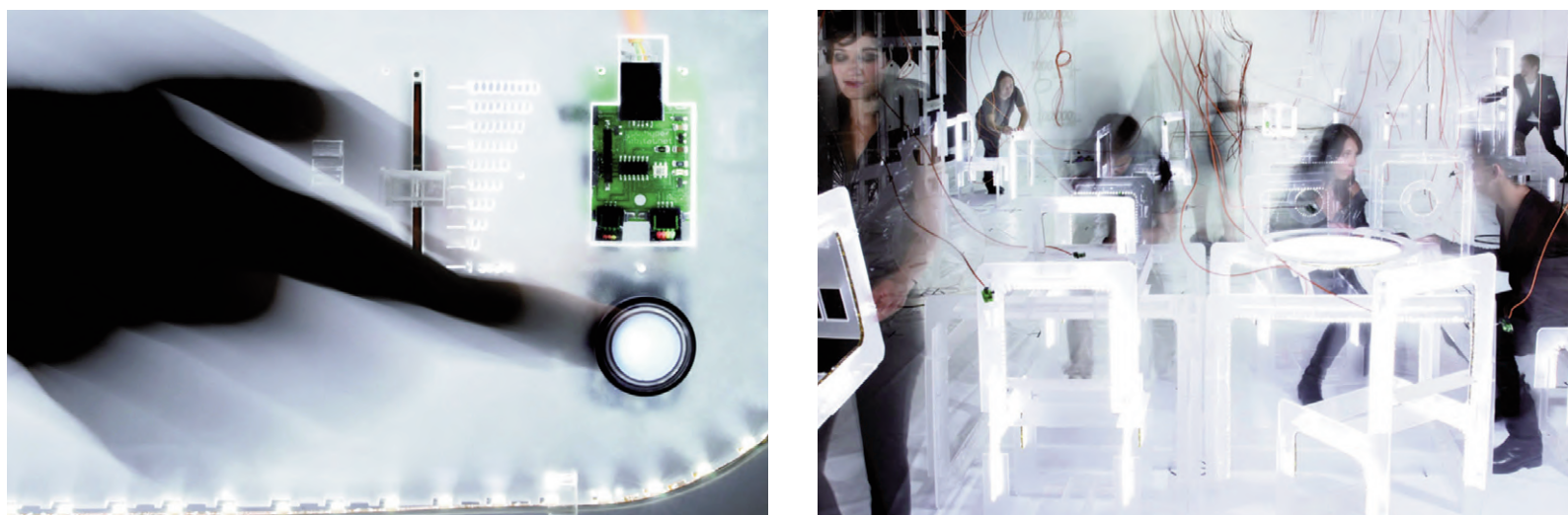
I vantaggi di una sempre più stretta relazione tra IoT e componenti edilizi si evidenziano oggi nel monitoraggio delle fasi costruttive e nell'efficientamento energetico degli edifici. In entrambi i contesti, i benefici tangibili e immediati in termini

di riduzione dei tempi/costi – attivabili tramite un approccio feedback-loop – rappresentano un aspetto chiave nella diffusione di tali prodotti sul mercato. Sempre più frequenti, infatti, sono le esperienze legate all'integrazione di sensori ed attuatori per il monitoraggio dei consumi idrici ed energetici, la regolazione del sistema edificio-impianto, la logistica o la verifica dello stato di avanzamento di un cantiere. Inoltre, essendo «[...] elementi consustanziali in grado di modificare la natura e l'identità del produttore di componenti in erogatore di servizi» (Ciribini, 2019), gli SCO introducono logiche di 'digital servitization' nel mercato delle costruzioni. L'espressione, facente riferimento all'erogazione di servizi digitali incorporati in un prodotto fisico, stimola una potenziale ridefinizione della prassi progettuale, imponendo il superamento della sola consistenza oggettiva: all'oggetto fisico si associano dunque nuove funzionalità, customizzabili e modificabili di continuo grazie proprio all'adattabilità delle tecnologie digitali.

Nel dominio del settore delle costruzioni, tali tecnologie possono promuovere appalti di servizi e procedure contrattuali basate sulla performance (Energy Performance Contract, Project Financing, Leasing), grazie a un controllo continuo e affidabile delle prestazioni e delle risorse impiegate, sia per il fornitore che per il cliente. La produzione di dati legati agli interventi di riqualificazione energetica, ad esempio, incentiva l'introduzione di nuovi attori sul mercato immobiliare favorendo business trasversali a più settori economici-produttivi (European Commission, 2020).

Il binomio IoT-SCO costituirebbe l'infrastruttura fisico-cibernetica necessaria per un progresso nel settore delle costruzioni, un'evoluzione fondata sui flussi di informazioni in grado di agevolare una maggiore interdipendenza tra le imprese coinvolte (Vendrell-Herrero et alii, 2017). Infatti, un'acquisizione maggiore di dati consente alle istituzioni finanziarie di ridurre drasticamente i rischi di investimento dovuti a una mancata standardizzazione dei progetti. L'estensione nel tempo del servizio associato a un bene favorisce, infine, l'introduzione di modelli economici basati sui principi di Product As a Service, Pay Per Use e Product Service Systems, grazie ai quali è possibile ripensare le modalità di produzione e uso dei beni nel settore delle costruzioni. L'esperienza condotta dall'Università di Delft nel promuovere il concetto di Façade Leasing (Azcárate-Aguerre, Den Heijer and Klein, 2018) costituisce un primo caso applicativo (Fig. 4). La trasformazione di un componente edilizio in un servizio multifunzionale e customizzabile direttamente dal cliente consente, da un lato, di riformulare i legami contrattuali tra cliente e fornitore, dall'altro, una maggiore attenzione rispetto ai parametri morfologici e prestazionali del bene fisico durante l'intera vita utile (Fig. 5).

Facciate intelligenti | L'evoluzione tecnologica dei sistemi di facciata presuppone la progettazione di componenti non solo altamente efficienti e capaci di adattarsi al mutare delle condizioni ambientali (Scalisi, 2020), ma anche digitalmente avanzate. Il crescente numero di esperienze ricollegabili al tema evidenzia un quadro prestazionale dell'involucro edilizio reso ancora più complesso dal suo ruolo strategico nel bilancio ener-



Figg. 1, 2 | 'Hyperhabitat' exhibition, Biennale di Venezia 2008 (credits: Guallart Architects, 2008).

getico ed economico dell'intero edificio (Fig. 6). La tendenza a trasformare le attività di riqualificazione energetica in nuove forme di investimento economico ha accelerato lo sviluppo di strumenti in grado di monitorare in continuo i livelli prestazionali e consentire azioni correttive qualora non vengano rispettati.

In questo contesto si muovono le esperienze del progetto ELISIR che, studiando le potenzialità associate al ruolo degli SCO per le attività di retrofit, testa l'idea di un isolamento a cappotto capace di rilevare eventuali comportamenti statici inconsueti e di serramenti intelligenti in grado di controllare gli apporti termici della radiazione solare (Rinaldi et alii, 2020). Il progetto, nell'ottica di attivare un processo innovativo virtuoso nell'ambito della componentistica edilizia, coinvolge i soggetti della ricerca accademica e di piccole e medie imprese. L'adattività del componente edilizio è anche al centro del progetto di ricerca RENZOZEB (Arnesano et alii, 2019) in cui le performance dell'edificio sono ottimizzate grazie all'integrazione di sensori e attuatori in componenti prefabbricati di involucro attraverso soluzioni plug&play in grado di comunicare con i sistemi di regolazione impiantistica (Fig. 7).

Lo studio di soluzioni digitalmente integrate, frutto della collaborazione e della partecipazione di stakeholder differenti, anticipano le richieste di un mercato ancora restio all'introduzione di componenti 'attivi' e complessi. Emergono quindi schemi di gestione economica orientati a fornire un servizio più che un prodotto, nonché la possibilità di convergere verso schemi di economia circolare, segnati dal continuo recupero e reimpiego di materia ed energia. Alle esperienze che tentano di regolare i flussi energetici al fine di ridurre i consumi del sistema edificio-impianto si aggiungono quelle finalizzate al controllo dei flussi materici, del comfort e alla logistica. La promozione di un approccio circolare all'interno del processo edilizio comporta un'attenzione maggiore alla correlazione tra le diverse fasi del ciclo di vita, ridefinendo processi produttivi, modalità di gestione e rapporti economico-finanziari tra i diversi stakeholder coinvolti nella filiera.

Una maggior complessità dovuta alla necessità di governare conoscenze trasversali e alla

volontà di creare nuovi legami tra i diversi attori viene, in parte, superata tramite la condivisione dell'informazione, quale linguaggio univoco e multiscalarare. Se, da un lato, il potenziale materiale informativo prodotto costituisce la base per ripensare anche la connotazione espressiva e percettiva della SF stessa, dall'altro l'attivazione di processi di feedback-loop consente di verificare l'efficacia delle strategie adottate e di informare le logiche del Design for Disassembly (Spósito and Scalisi, 2020). Il mercato richiede oggi una maggior trasparenza nella tracciabilità e nella conoscenza dei materiali utilizzati, al fine di ripensare le modalità di reintroduzione degli stessi nei cicli produttivi una volta giunti al loro fine vita tecnologico.

In quest'ottica, l'approccio del progetto BAMB (Building As a Material Bank) ha consentito l'istituzione di un inventario materico per ogni edificio, per prevenire la produzione di rifiuti da demolizione e costruzione e consentirne una corretta gestione (Heinrich and Lang, 2019). Il progetto individua nell'utilizzo congiunto di BIM e tecnologie ICT la possibilità di creare una value chain dei materiali, in grado peraltro di fornire, dai produttori agli utenti finali, una consapevolezza nuova rispetto al 'valore residuo' della materia, innescando potenziali dinamiche comportamentali 'pro-ambientali' (Fig. 8). A partire da standard aperti ed interoperabili tra i diversi software di progettazione e produzione come gli IFC, Niu et alii (2019) hanno messo a punto un sistema per la produzione di moduli di facciata prefabbricati in grado di conservare tutte le informazioni tecnico-economiche in una memoria integrata nel componente, 'dialogando' con le macchine di movimentazione presenti in cantiere tramite Bluetooth per ottimizzare i tempi di installazione e aumentare la sicurezza in cantiere (Fig. 9).

L'elaborazione dei dati raccolti, correlati alla conoscenza della vita utile dei singoli componenti o allo stato di conservazione degli stessi, potrebbe incentivare attività di manutenzione predittiva al fine di estenderne la service life. In questo ambito, alcune esperienze integrano i principi della supply chain nella filiera produttiva dei componenti edilizi per mezzo di tecnologie RFID (Lee et alii, 2013) e di schemi per la produzione, conservazione e gestione dei dati nel tempo, in un

modello Digital Twin in grado di contenere le informazioni necessarie alla gestione ottimale dei flussi materici (Fig. 10). In quest'ottica risulta facile immaginare come una tale infrastruttura informativa possa rappresentare un valore aggiunto per l'immobile stesso. Nelle attività di due diligence, ad esempio, sia per la compravendita sia per l'affidamento di servizi, la possibilità di valutare il comportamento negli anni di un sistema di facciata o tracciarne le attività di manutenzione garantirebbe un supporto (o una maggiore trasparenza) negli investimenti immobiliari.

La possibilità di ripensare i sistemi di facciata come superfici dinamiche, sensibili e responsive apre infine a scenari di ricerca promettenti anche nel campo del monitoraggio dei parametri ambientali. È ipotizzabile, ad esempio, una mappatura urbana dei principali fenomeni microclimatici e della propagazione di inquinanti nocivi per la salute dell'uomo mediante una rete capillare e diffusa di sensori, di cui le facciate degli edifici costituirebbero il supporto. Le esperienze in corso al Politecnico di Torino¹ nel monitoraggio della diffusione delle polveri sottili PM_{2,5} e PM₁₀, attraverso sensori low-cost (Fig. 11) integrabili nei serramenti, testimoniano come la conoscenza real-time delle condizioni ambientali esterne possa rappresentare un vantaggio nell'evidenziare pattern di distribuzione degli inquinanti e possibili correlazioni tra questi e i caratteri morfologici e materici dell'ambiente costruito, nell'ottica di promuovere una città sana (Giovanardi, Giusto and Pollo, 2020; Fig. 12).

Conclusioni | La transizione digitale verso una città in grado di mitigare la propria impronta ecologica richiede un'infrastruttura virtuale integrata nell'impianto urbano (Fig. 13). Gli approcci processuali emergenti (SC e SB) e l'evoluzione del prodotto edilizio verso un servizio integrato (SCO e SF) rappresentano dunque un possibile volano verso la transizione ecologica, nell'ottica in cui questi possano garantire un maggiore controllo su processi, fenomeni, eventi più o meno prevedibili. La necessità di rinnovamento radicale nei processi e nei prodotti imposta dall'emergenza ambientale comporta dunque una terza transizione, ovvero quella dall'industria delle costruzioni all'industria dell'ambiente costru-

to, basata su economie digitali ed estesa alla scala urbana. In quest'ottica, il monitoraggio continuo e la ri-programmazione di fenomeni e processi alla scala urbana diventano strumenti imprescindibili per uno sviluppo che individua nella sostenibilità la principale strategia future-proofing (Del Nord, 2016). Il grado di maturazione tecnologica dell'IoT e la crescente facilità di accesso alla rete consente di immaginare una città dotata di un apparato sensibile in cui anche i componenti edilizi, e in particolare l'involucro, divengono nodi diffusi dell'infrastruttura ICT, interagendo con gli utenti e fornendo indicazioni in tempo reale sul loro funzionamento, sulla manutenzione e sui parametri ambientali.

Il modello economico circolare ridefinisce il processo edilizio nelle modalità produttive, di gestione e nei rapporti economico finanziari tra i diversi stakeholder coinvolti nella filiera. Se, da un lato, la promozione di tali principi impone un'innovazione di prodotto e di nuove logiche progettuali per superare il semplice paradigma del riciclo, dall'altro richiede un aggiornamento dei processi, in una dimensione transdisciplinare e di collaborazione tra gli stakeholders coinvolti. La gestione delle informazioni prodotte dalla digitalizzazione implica infine un decisivo e diretto coinvolgimento della cittadinanza. In quest'ottica, la gestione degli aspetti relativi alla privacy e all'uso dei dati da parte di soggetti commerciali coinvolti nell'infrastruttura ICT e IoT diventano questioni dirimenti, che necessitano di maggiore dibattito e regolamentazione, non più rimandabili.

Nel campo della cybersecurity gli episodi legati ad un uso improprio o non trasparente delle informazioni esistono e sono sempre più frequenti, e necessitano di un condiviso e aggiornato protocollo globale. È pertanto auspicabile anche la presenza di soggetti pubblici nella definizione dei protocolli per la gestione delle reti

(Rifkin, 2019). Di fatto, la raccolta del dato, ad alta risoluzione spazio-temporale, e l'informazione elaborata, disponibile a produttori e consumatori, può costituire un potente mezzo verso il 'decoupling' tra crescita economica e impatto sull'ambiente (Santarius, Pohl and Lange, 2020), attraverso la promozione di una dimensione autopoietica dei sistemi insediativi, raggiungibile per mezzo di una conoscenza diffusa, accessibile, pervasiva.

Hyperhabitat – Reprogramming the World: this was the name chosen for the installation curated by Vicente Guallart at the XI International Architecture Exhibition of the Venice Biennale (2008). It explored the potential of Information Technology (IT) in 'reorganizing' the world, from the single object to the global scale (Fig. 1, 2). The idea was to prefigure a hybrid reality, in which the physical world would be entirely reprogrammed according to the principles of a virtual network (Guallart Architects, 2008). In other words, the concept was to define a multi-scalar structure to connect all elements across a digital entity. An information structure capable of identifying and establishing new relational systems. In this perspective, the network and information technologies would represent the opportunity to re-establish hierarchies, connections, and relationships between the elements of the built environment, the natural one, and man.

More than a decade later, the 'provocation' of the Spanish architect and urbanist still has the characteristics of a future dimension. However, some virtuous experiences in Smart City projects related to the management of complex networks of services in an urban environment are beginning to show their first benefits. The SC concept

is defined as a technological, organizational, managerial, and ethical response to the challenges posed by the ever-changing environmental, social, and economic context. The attribute 'smart' linked to the 'city' confirms the central role of data in the management of urban processes. Indeed, urban data is understood not only as a cognitive element for urban design but also as widespread and accessible information on elements, infrastructures, and places of the city itself (Losasso, 2015). The current hybridization between ICT technologies and the 'stone city' produces urban assets which are very different from those that history has delivered to us (Fardoli, 2018). The widespread presence of information networks – the new paradigm of the urban hyperhabitat – promotes processes based on peer-to-peer relationships aimed at creating new multi-scalar structures and relationships (Guallart Architects, 2008). This vision includes hypotheses related to the Self Sufficient City (Guallart, 2010), which associate the exchange of information on a global scale with the local production of goods, a city in which it is possible to produce resources, work and live on a local level while remaining connected on a global level.

The ability to produce and process a large amount of data in order to improve the efficiency of services, the way they are used, and the economic competitiveness of the whole system lead to conceive the city as a set of measurable instances in a close mutual relationship. This phenomenon, defined as 'datification' (Mayer-Schöenberger and Cukier, 2013), involves data – and information – of many aspects of our lives, to which a value is attributable. Thus, the idea of a city in which public administrations, managers and designers can constantly reprogram the functioning according to data collected and processed in real-time is reconfigured through advanced

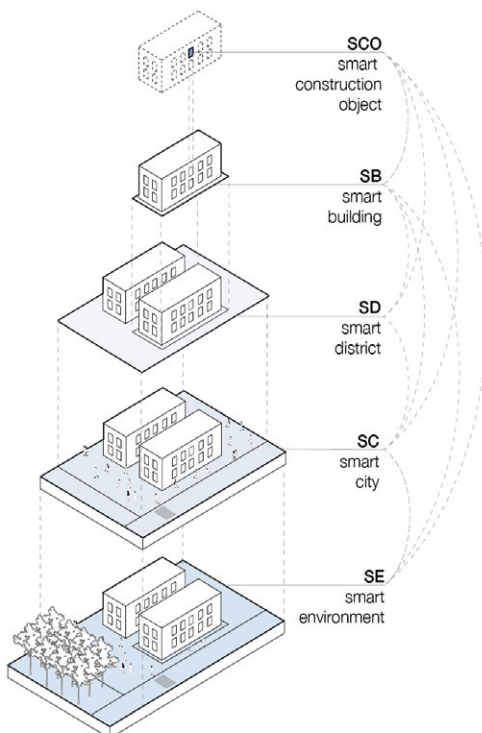


Fig. 3 | Digital urban infrastructure (credit: M. Giovanardi).



Fig. 4 | Façade Leasing project developed by TU Delft (credit: J. F. Azcárate-Aguerre, 2015).

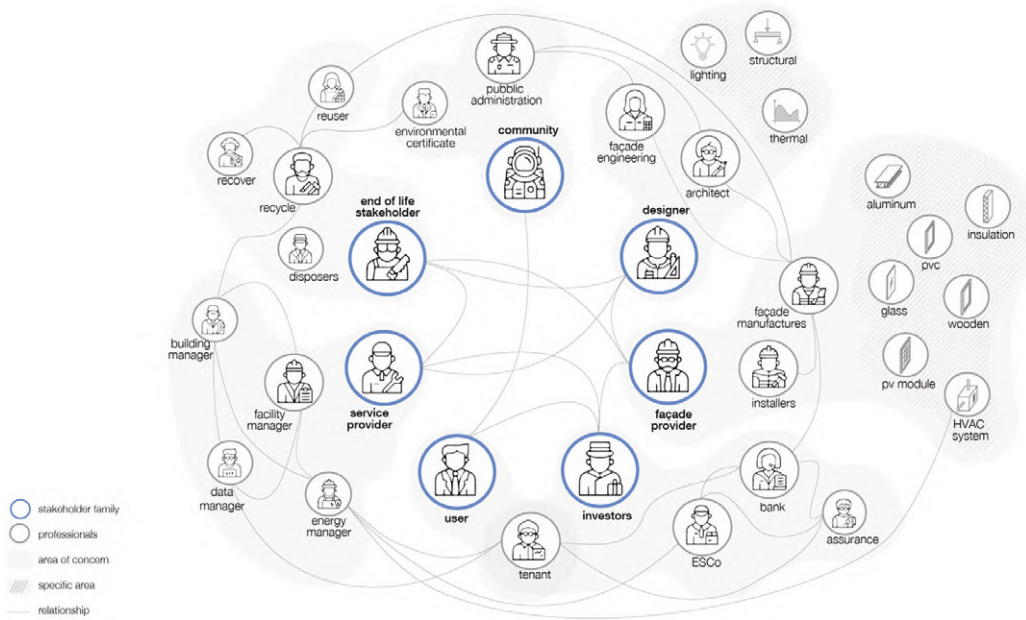


Fig. 5 | Stakeholder map in façade sector (credit: M. Giovanardi).

mathematical algorithms. SC today hinges on an environmental intelligence (Ratti and Claudel, 2017) able to optimize/contract inputs and outputs of complex processes, including waste management, energy supply or mobility. Assuming a widespread diffusion of networks, it is possible to prefigure the Smart Urban Metabolism (Shahrokni Lazarevic and Brandt, 2015) implementation for the governance of cities through the continuous monitoring of matter, energy and information flows (Pollo, Trane and Giovanardi, 2021). In this context, the city and each of its parts become potential generators of information, according to a logic by which each building constitutes a node in the global network (Rifkin, 2019). As in an interrelated and connected system, the SC, therefore, needs a capillary and widespread structure on the territory, as the first level of knowledge required to understand the phenomena in action (Fig. 3).

This paper addresses the issue of change brought by ICT technologies in the construction sector in order to promote new approaches, in line with the principles of Circular Economy, aimed at the creation of a widespread cognitive model of Urban Metabolism. Within the SC boundary, the authors intend to bring out the potential role of information produced by intelligent building components. Starting from the relationship between Internet of Things (IoT) and Smart Construction Object (SCO), this article explores the benefits that can be activated by the introduction of the logic of Product as a Service in façade systems, as a strategic component in the regulation of energy and matter flows on the building and urban scale.

Smart Construction Object | The evolution of SC is enabled by the spread of the concepts of Smart Building (SB) and SCO, as integration between contemporary scientific and technological knowledge, as well as the transposition of IoT into the building system. Specifically, SCOs are defined as materials, tools, devices, components, or structures capable of sensing, process-

ing, and sharing information so that they have autonomy and awareness and can interact with each other to enable better decision making by the user (Niu et alii, 2016). Their operation, also based on the active and pervasive use of ICT technologies, takes advantage of the intelligence brought by the IoT to offer users new functions, services and ways of interacting. At the same time, the introduction of the immaterial component within the building system changes its design and management methods, prefiguring both formal and performance diversification. Although still in an experimental phase, applications in this context have shown how the ability of a physical object to produce and share information about our experience or its operation can generate profits higher than its own value in the long run (Ciribini, 2019). Their field of application, as confirmed by current experiences, is wide and in part still unexplored, but promises direct spillovers on the role that different stakeholders play in the management of the building process (Niu et alii, 2016).

The benefits that can be derived from the increasingly close relationship between IoT and building components are now evident in the monitoring of construction phases and the energy efficiency of buildings. In both contexts, tangible and immediate benefits in terms of time/cost reduction – which can be activated through a feedback-loop approach – represent a key aspect in the market diffusion of such products. More and more frequent are the experiences related to the integration of sensors and actuators for the monitoring of water and energy consumption, the regulation of the building-installation system, logistics or the verification of the progress of a construction site. Moreover, ‘being consubstantial elements able to change the nature and identity of the component manufacturer into a service provider’ (Ciribini, 2019), SCOs introduce ‘digital servitization’ approaches in the construction market. This expression, which refers to the provision of digital services embedded in a physical product, encourages a potential redefinition of

the design practice, as the product is much more than just an object; in other words, the physical object is associated with new functionalities that can be customized and modified continuously thanks to the adaptability of digital technologies.

In the domain of the construction sector, these technologies can further promote service contracts and contractual procedures based on performance (e.g., Energy Performance Contract, Project Financing, Leasing), thanks to continuous and reliable control of performance and resources used, both for the supplier and the client. The production of data related to energy requalification interventions, for example, promotes the introduction of new players in the real estate market by fostering cross-sectoral business across multiple economic-productive sectors (European Commission, 2020).

The IoT-SCO combination would thus constitute the physical-cybernetic infrastructure required for continuous progress in the construction sector, an evolution based on continuous flows of information and knowledge that can facilitate greater interdependence among the businesses involved (Vendrell-Herrero et alii, 2017). Indeed, increased data acquisition allows financial institutions to drastically reduce investment risks due to a lack of project standardization. Finally, the extension over time of the service associated with an asset favours the introduction of economic models based on services. The Product as a Service, Pay Per Use and Product Service Systems approaches allow us in fact to rethink how goods are produced and used in the construction sector. The experience carried out by the University of Delft in promoting the Façade Leasing concept (Azcarate-Aguerre, Den Heijer and Klein, 2018) constitutes a first application case (Fig. 4). The transformation of the building component into a multifunctional and customizable service directly on behalf of the customer allows, on the one hand, to redesign the contractual ties between customer and supplier, and on the other hand, a greater attention with regard to the morphological and performance parameters of the physical asset throughout its useful life (Fig. 5).

Smart façade | The technological evolution of façade systems develops from designing components that are highly efficient, adaptive to environmental conditions (Scalisi, 2020) and digitally advanced. The growing number of experiences in this field sheds light on the complexity of the performances attributable to a building framework, considering also its strategic role in the energetic and economic balance of the entire building (Fig. 6). The tendency to transform energy requalification into new forms of economic investment has been boosting the development of tools able both to continuously monitor performance levels and correct them if needed.

In this context, the experience of the ELISIR project is researching the potential of the role of SCOs for retrofit activities, testing a coat insulation, detecting suspected static movements and a smart window regulating thermal contributions via solar radiation (Rinaldi et alii, 2020). Broadly speaking, the project aims to activate a virtuous innovation process in the field of build-

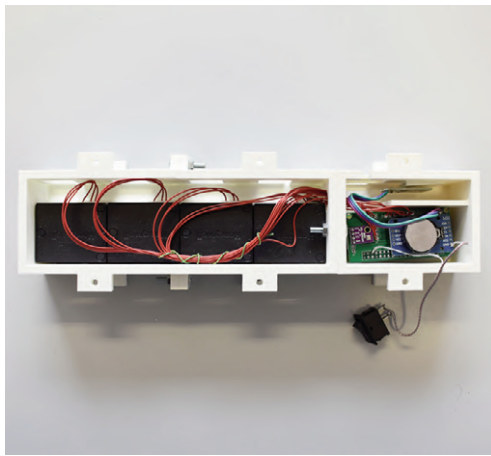
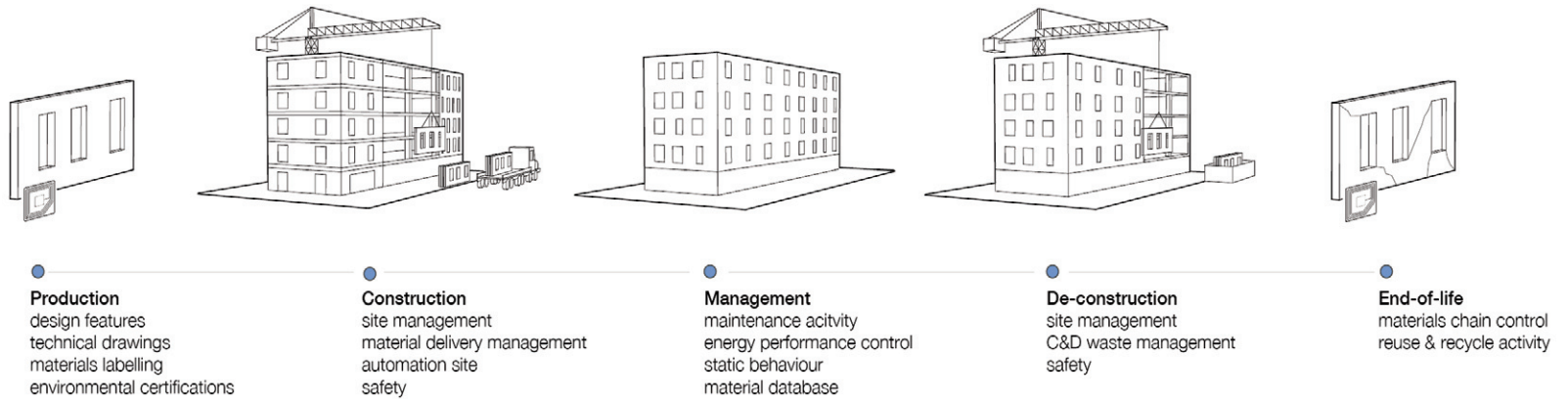


Fig. 10 | Potential information collected over the life of a façade using RFID sensors (credit: M. Giovanardi).



Fig. 11 | PM sensor case developed by DAUIN, Politecnico di Torino (credit: M. Giovanardi).

Fig. 12 | Proof of concept for Smart Windows (credit: M. Giovanardi).

containing the information for the optimal management of material flows (Fig. 10). From this perspective, it should be easy to imagine how such an information infrastructure could represent added value for the building itself. In due diligence activities, for example, both for buying and selling and for contracting services, assessing the behaviour over time of a façade system or the traceability of maintenance activities would ensure greater transparency for real estate investments.

Finally, the possibility of rethinking façade systems as dynamic, sensitive, and responsive surfaces opens up promising research scenarios also in the field of monitoring environmental parameters. As an example, a digital infrastructure for mapping the main microclimatic phenomena and the propagation of pollutants could be enabled by the communication between these diffused smart components and a central urban data centre. The ongoing experiences in progress at the Polytechnic of Turin¹ in monitoring the spread of particulate matter (PM2.5 and PM10) by low-cost sensors (Fig. 11) that can be integrated into the windows are proving how real-time knowledge of outdoor environmental conditions can highlight patterns of pollutant distribution and possible correlations between these and the morphological and material characteristics of the built environment, with a view to promoting a healthy city (Giovanardi, Giusto and Pollo, 2020; Fig. 12).

Conclusions | The digital transition to a city able to mitigate its ecological footprint needs a virtual infrastructure to be embedded in the urban system (Fig. 13). The emerging SC and SB approach with the evolution of the building product towards an integrated service (SCO and SF) can result in a driver towards the ecological transition. From this perspective, their pervasive presence is likely to guarantee greater control over processes, phenomena, and more or less predictable events. Therefore, the current environment emergency needs a deep process and product renewal, thus implying a (third) transition: from the construction industry to a built environment industry, based on digital economies and extended to the urban scale. Urban processes and phenomena monitoring and re-programming could be generally assumed to play a key role in a sustainable and future-proof devel-

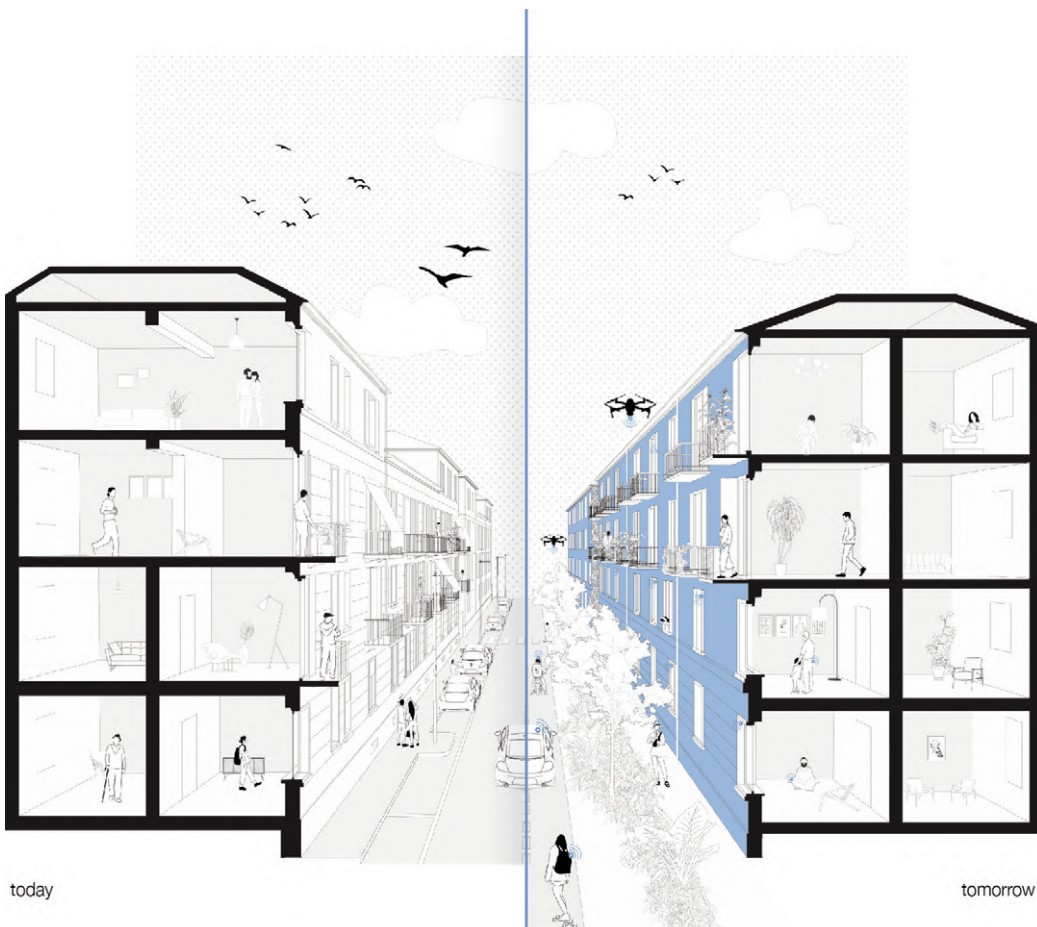


Fig. 13 | Future 'senseable' façade concept (credit: M. Giovanardi).

opment (Del Nord, 2016). The technological maturity of the IoT and the increasingly easy access to the network may lead to imagining a city equipped with a sensitive apparatus. Here the building components, and the envelope in particular, would become widespread nodes of the ICT infrastructure, interacting with users and providing real-time indications on their actions, maintenance and environmental parameters.

As discussed, the circular economic model redefines the building process in the production, management and financial relationships between the stakeholders involved, too. On the one hand, adopting such a renewed approach requires product innovation and new design logics to overcome the recycling paradigm. On the other

hand, it calls for an update of the processes, in a transdisciplinary dimension and collaboration between the stakeholders. Finally, the management of information produced by digitalization implies a decisive and direct engagement of citizenship. From this perspective, the issues concerning privacy and use of data by entities which are part of the ICT and IoT infrastructure become central and still need more debate and regulation, no longer postpone-able.

The risks of improper or non-transparent use of information (cybersecurity) exist and are going to become more and more frequent. Its regulation would require a shared and updated global protocol, for which the active role of governmental bodies would be desirable (Rifkin, 2019). In

fact, the collection of high spatio-temporal resolution open data and the information arising might represent the enabling element for the 'decoupling' between economic growth and environmental impact (Santarius, Pohl and Lange, 2020). To this end, the autopoietic dimension of settlement systems would be achieved also by means of widespread, accessible and pervasive knowledge.

Acknowledgements

The contribution is the result of a common reflection of the authors. Nevertheless, the introductory paragraph has to be attributed to M. Trane, the paragraphs 'Smart Construction Object' and 'Smart façade' to M. Giovanardi and 'Conclusions' to R. Pollo.

Note

1) The experiences mentioned refer to the 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' (Associated Investigator of the Research Unit of the Politecnico di Torino: Prof. R. Pollo).

References

Arnesano, M., Bueno, B., Pracucci, A., Magnagni, S., Casadei, O. and Revel, G. M. (2019), "Sensors and control solutions for Smart-IoT façade modules", in *2019 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)*, pp. 1-6. [Online] Available at: ieeexplore.ieee.org/document/8805024/ [Accessed 24 October 2021].

Azcárate-Aguerre, J. F., Den Heijer, A. and Klein, T. (2018), "Integrated façades as a Product-Service System – Business process innovation to accelerate integral product implementation", in *Journal of Façade Design and Engineering*, vol. 6, issue 1, pp. 41-56. [Online] Available at: doi.org/10.7480/jfde.2018.1.1840 [Accessed 17 October 2021].

Ciribini, A. L. C. (2019), "Gli Smart Construction Object – Illustri sconosciuti", in *Ingenio*, 11/02/2019. [Online] Available at: ingenio-web.it/22561-gli-smart-construction-object-illustri-sconosciuti [Accessed 18 October 2021].

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*, FrancoAngeli, Milano, pp. 121-126.

European Commission (2020), *Private finance for energy efficiency – New solutions for funding Europe's energy transition*. [Online] Available at: cordis.europa.eu/article/id/422225-private-finance-for-energy-efficiency-new-solutions-for-funding-europes-energy-transition [Accessed 13 September 2021].

Faroldi, E. (2018), "Architectural intelligence", in *Techné | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 1, special series, pp. 7-8. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-23561 [Accessed 21 October 2021].

Giovanardi, M., Giusto, E. and Pollo, R. (2020), "Infrastrutture digitali nei componenti di involucro per la gestione degli edifici", in Perriccioli, M., Rigillo, M., Russo Ermolli, S. and Tucci, F. (eds), *Design in the digital age – Technology, nature, culture*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (RN), pp. 238-242.

Gualart Architects (2008), *Hyperabitat – Reprogramming the world*. [Online] Available at: gualart.com/projects/hyperhabitat-reprogramming-the-world [Accessed 12 October 2021].

Gualart, V. (2010), *Self-sufficient city*, Actar Publishers, New York.

Heinrich, M. and Lang, W. (2019), *Material Passports – Best practice – Innovative solutions for a transition to a Circular Economy in the built environment*, TUM University, Monaco. [Online] Available at: bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/02/BAMB_MaterialsPassports_BestPractice.pdf [Accessed 15 October 2021].

Lee, J. H., Song, J. H., Oh, K. S. and Gu, N. (2013), "Information lifecycle management with RFID for material control on construction sites", in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 27, pp. 108-119. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1016/j.aei.2012.11.004 [Accessed 15 October 2021].

Losasso, M. (2015), "Rigenerazione urbana – Prospettive di innovazione | Urban regeneration – Innovative perspectives", in *Techné | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 10, pp. 4-5. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-17492 [Accessed 11 October 2021].

Mayer-Schöenberger, V. and Cukier, K. (2013), *Big data – Una rivoluzione che trasformerà il nostro modo di vivere e già minaccia la nostra libertà*, Garzanti, Milano.

Niu, Y., Lu, W., Chen, K., and Huang, G. Q. (2016), "Smart Construction Object", in *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 30, issue 4, pp. 1-10. [Online] Available at: [dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000550](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000550) [Accessed 15 October 2021].

Niu, Y., Lu, W., Xue, F., Liu, D., Chen, K., Fang, D. and Anumba, C. (2019), "Towards the 'third wave' – An SCO-enabled occupational health and safety T management system for construction", in *Safety Science*, vol. 111, pp. 213-223. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ssci.2018.07.013 [Accessed 10 September 2021].

Pollo, R., Trane, M. and Giovanardi, M. (2021), "Urban Metabolism, modelli interdisciplinari e progetto a scala microurbana | Urban Metabolism, interdisciplinary models and design at micro-urban scale", in *Techné | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 21, pp. 154-164. [Online] Available at: doi.org/10.13128/techne-9857 [Accessed 22 October 2021].

Ratti, C. and Claudel, M. (2017), *Le città di domani – Come le reti stanno cambiando il futuro urbano*, Einaudi, Torino.

Rifkin, J. (2019), *Un Green Deal globale – Il crollo della civiltà dei combustibili fossili entro il 2028 e l'audace piano economico per salvare la Terra*, Mondadori, Milano.

Rinaldi, S. Bellagente, P., Ciribini, A. L. C., Tagliabue, L. C., Poli, T., Mainini, A. G., Speroni, A., Cadena, J. D. B. and Spagnolo, S. L. (2020), "A Cognitive-Driven Building Renovation for Improving Energy Efficiency – The Experience of the ELISIR Project", in *Electronics*, vol. 9, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/electronics9040666 [Accessed 10 October 2021].

Santarius, T., Pohl, J. and Lange, S. (2020), "Digitalization and the decoupling debate – Can ICT help to reduce environmental impacts while the economy keeps growing?", in *Sustainability*, vol. 12, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12187496 [Accessed 05 October 2021].

Scalisi, F. (2020), "Adaptive facade and Phase Change Materials (PCMs) – A sustainable approach for building construction", in Scalisi, F. (ed.), *From Mega to Nano | The Complexity of a Multiscalar Project*, Palermo University Press, Palermo, pp. 44-69. [Online] Available at: doi.org/10.19229/978-88-5509-189-3/432020 [Accessed 17 October 2020].

Shahrokni, H., Lazarevic, D. and Brandt, N. (2015), "Smart Urban Metabolism – Towards a Real-Time Understanding of the Energy and Material Flows of a City and Its Citizens", in *Journal of Urban Technology*, vol. 22, issue 1, pp. 65-86. [Online] Available at: doi.org/10.1080/10630732.2014.954899 [Accessed 21 October 2021].

Sposito, C. and Scalisi, F. (2020) "Ambiente costruito e sostenibilità – Materiali riciclati e Design for Disassembly tra ricerca e buone pratiche | Built environment and sustainability – Recycled materials and Design for Disassembly between research and good practices", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 106-117. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/8102020 [Accessed 17 October 2020].

Vendrell-Herrero, F., Bustinza, O. F., Parry, G. and Georgantzis, N. (2017), "Servitization, digitization and supply chain interdependency", in *Industrial Marketing Management*, vol. 60, pp. 69-81. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.06.013 [Accessed 23 October 2021].