

The Internet of Things for the circular transition in the façade sector

Original

The Internet of Things for the circular transition in the façade sector / Giovanardi, Matteo; Konstantinou, Thaleia; Pollo, Riccardo; Klein, Tillmann. - In: *TECHNE*. - ISSN 2239-0243. - (In corso di stampa).

Availability:

This version is available at: 11583/2973382 since: 2022-11-25T10:36:43Z

Publisher:

Firenze University Press

Published

DOI:

Terms of use:

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

The Internet of Things for the circular transition in the façade sector

Matteo Giovanardi¹, <https://orcid.org/0000-0001-8037-3381>

Thaleia Konstantinou², <https://orcid.org/0000-0001-7085-312X>

Riccardo Pollo³, <https://orcid.org/0000-0002-6933-6368>

Tillmann Klein², <https://orcid.org/0000-0001-7883-1953>

¹ Department of Architecture and Design DAD, Politecnico di Torino, Italy

² Department of Architectural Engineering + Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment, Delft University of Technology, The Netherlands

³, Interuniversity Department of Regional and Urban Studies and Planning DIST, Politecnico di Torino, Italy

Primary Contact: Matteo Giovanardi, matteo.giovanardi@polito.it

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

Published: October 22, 2022

DOI: 10.36253/techne-13707

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 creation of dematerialised markets. The aim of the article is to clarify the role of IoT in enabling five circular business models in the façade sector. Through a matrix highlighting the relationship between information produced and key actions to achieve the innovative business models, the potential benefits of a smart façade system are highlighted. The research findings and conclusions of the article offer an opportunity to imagine innovative scenarios in the design of digitally integrated building components.

Keywords: energy citizenship; Positive Energy Districts (PEDs); climate neutrality; energy transition; community.

Please cite this article as:

Giovanardi, M., Konstantinou, T., Pollo, R., Klein, T. (2022). The Internet of Things for the circular transition in the façade sector / L'Internet of Things per la transizione circolare nel settore delle facciate. *Techne. Journal of Technology for Architecture and Environment*, Just Accepted.

Introduction

In recent years, the combinatory 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 the reuse of 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 companies 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. A rapid and concrete paradigm shift requires, in fact, 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 (CBM) (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 markets.

In the façade sector, the demand generated by the incentives for the energy efficiency of the existing building stock (in Italy they generate about 85% of the demand) facing with the continuous fluctuations in the cost of energy, gas and raw materials (the cost of aluminium in the last year increased by 140%) (UNICMI, 2021). In the perspective of a circular transition, this condition finds in technical innovation an essential and diversified action (Azcarate-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 show the dependency between CBMs and 19 different types of information that can be produced by IoT systems that can be integrated into envelope components. Through the identification of key actions enabled by the IoT, the groundwork is laid 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 and alternative 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. (2018), define CBMs as the logic by which an organisation creates, delivers and captures value to close and slow 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 the rental of construction equipment and plants (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 to rethink 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 able to 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 lead to greater compliance with environmental regulations and protocols, influencing the choice of the end customer.

Recovery and recycling. As the recovery, 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 the creation of second-hand markets and make 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 circular flows. 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, design 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 the management one concerns mainly to 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 on the basis of the information gathered makes 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 represents the most suitable CBM for combining economic competitiveness and environmental sustainability (Tukker, 2004) (Bocken et al., 2014). The innovative aspect of this model 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, the concept of 'Façade As a Service', a set of services integrated into the technological system, is emerging strongly 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 the Circular Economy

If it is true that 'data drives CE', the IoT can be an enabler phenomenon for new CBMs. Defined by Atzori et al. (2016) as «a conceptual framework that leverages on the availability of heterogeneous devices and interconnection solutions», the IoT today represents a unique opportunity for businesses. In particular, the generation of big data can trigger data-driven approaches for continuous updating of asset characteristics (Bressanelli et al., 2018), support the monitoring of long and complex processes, or facilitate end-of-life management (Ingemarsdotter et al., 2020). The ability to guide stakeholders' decision-making processes thanks to 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 represent 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). 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. This approach is particularly effective in the installation 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. Present on the market at limited prices, and 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 services (e.g. data sales). The former allow a control of the on-site performance of the asset, the 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'¹ which, through the use of sensors detecting light intensity integrated in the spacer of the glazing, guarantees hyperlocal monitoring for the optimisation of energy consumption. The latter, on the other hand, tend to respond to new needs. For example, increased attention to issues of environmental health and quality requires the creation of environmental datasets that more accurately describe the interaction between the built and natural environment.

Asset Monitoring Sensors. This family refers to the set of physical parameters 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 WoodSense² 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 SenseTrack³, for the remote control of openings. In this way, the sensor integrated in the window frame 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 phenomena of structural damage.

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 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 integrate information technology. This is due to the fact that the extension of responsibility for the good into the after-sales phases requires continuous monitoring of the system in use. The ability to monitor via embedded IoT devices the performance of the asset may enable new forms of contracting based on the duration or performance offered. In this perspective, sensors for environmental monitoring introduce new customisable functionalities. The CBM concerning life extension is also particularly influenced by the availability of information about

the asset. On the one hand, quick access to maintenance instructions would guarantee, in addition to time and cost savings, proper management of the asset; on the other hand, the introduction of sensors for monitoring the state of preservation (e.g. number of opening cycles, surface temperatures, humidity, etc.) could enable predictive maintenance logics. Trending of failure modes and recurrence and identification of the main causes would, in addition to the continuous redesign of the technological system, favour the development of after-sales insurance practices. In the face of increasingly complex façade systems and increasingly acute environmental stresses, this approach may prove decisive.

The development of shared platforms are, by their very nature, 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 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 promoting a 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 able to bring 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 scenarios, not too far away, in which the use of the information produced by the asset itself can help us manage it in the best possible way. It does not seem impossible today to think that a smart envelope component could alert the maintainer 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. It is precisely the introduction of new dematerialised services that represents the most interesting outcome of the IoT in the circular perspective. 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 legal nature (e.g. legal liability of the good in Product As a Service models, data ownership, etc.). To conclude, the perspectives that emerged from the research, although to be validated with the main players of the sector, clarify how IoT 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

1. <https://www.physee.eu/sense/sense-by-physee>
2. <https://www.woodsense.com>
3. <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 (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. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2018.02.001>.
- Bressanelli, G., Adrogegari, F., Perona, M. and Sacconi, N. (2018), “Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies”, *Sustainability*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030639>.
- 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. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1379095>
- European Commission (2020), “A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe”. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN> (Accessed on 31/08/2022)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
- 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, 130395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130395>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105047>.
- 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 (Accessed on 31/08/2022)

Images

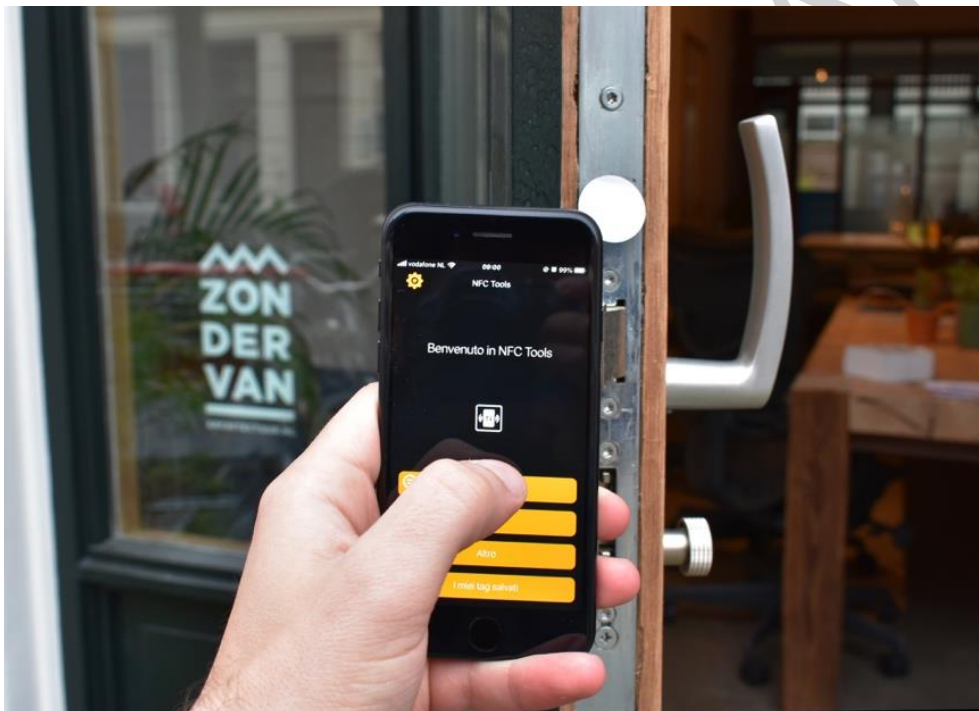


Fig. 01 - NFC tags identifiable by smartphone

ENVIRONMENTAL MONITORING

- ⊙ Air temperature (in/out)
- ⊙ Relative humidity
- ⊙ Air pressure
- ☀ Light intensity
- 🔊 Sound
- 🌬 Wind speed
- 🌊 Water flow
- ⊙ Gases, chemical

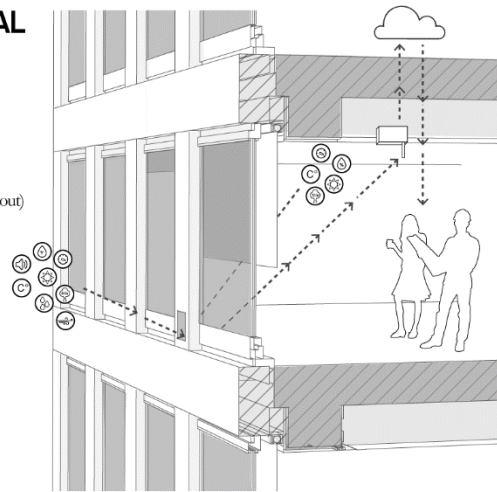


Fig. 02 - Main environmental parameters that can be monitored with façade-integrated IoT systems

ASSET MONITORING

- ⊙ Surface temperature
- ⊙ Inner moisture
- ⊙ Cavity pressure
- ☀ Surface radiation
- 🔊 Vibration, speed
- 🌊 Air, water flow
- # Counter (opening, etc.)
- 👤 Presence

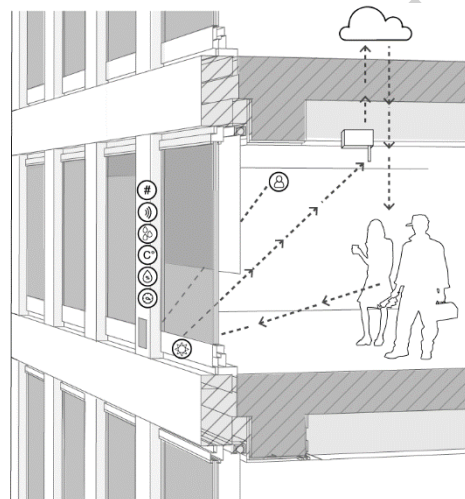


Fig. 03 - Main product parameters that can be monitored with façade-integrated IoT systems

CIRCULAR FAÇADE

What information provided by IoT is needed to enable new Circular Business Models?

		information provided by IoT																			
		Identification	Geolocalization	Producer 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	
CIRCULAR BUSINESS MODELS and CIRCULAR ACTIONS	Circular Supply Chain 	Tracking materials and products	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																
		Tracking processes		<input type="radio"/>																	
		Ensuring short and certified chain	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																	
		Optimizing time and cost	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																	
		Improving transparency and quality	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>																
	Recovery and Recycling 	Facilitating selective disposal	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																
		Identifying products	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>																
		Assessing current asset value		<input type="radio"/>										<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Promoting Material Passport	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																
		Reselling products and components	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>																
	Service Life Extension 	Facilitating maintainability	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>																
		Fostering predictive maintenance	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Tracking facility services	<input type="radio"/>																	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Providing guide and instructions	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>																
		Developing historical trend datasets	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>									<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	Product As a Service 	Supporting service oriented contract	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Monitoring in-use performance	<input type="radio"/>			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Integrating customized services				<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>								<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Updating technological features	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>													<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
		Creating new services	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Shared Platform 	Swapping products and/or services	<input type="radio"/>																			
	Increasing second market	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>																	
	Supporting Urban Mining concept	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>																	
	Enhancing feedback approach	<input type="radio"/>											<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
	Engaging stakeholders			<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>		<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>								<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Fig. 04 - The matrix highlights the relationship between CBM and information produced by the IoT

L'Internet of Things per la transizione circolare nel settore delle facciate

Matteo Giovanardi¹, <https://orcid.org/0000-0001-8037-3381>

Thaleia Konstantinou², <https://orcid.org/0000-0001-7085-312X>

Riccardo Pollo³, <https://orcid.org/0000-0002-6933-6368>

Tillmann Klein², <https://orcid.org/0000-0001-7883-1953>

¹ Dipartimento di Architettura e Design DAD, Politecnico di Torino, Italia

² Department of Architectural Engineering + Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment, Delft University of Technology, The Netherlands

³ Dipartimento Interateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio DIST, Politecnico di Torino, Italia

Primary Contact: Matteo Giovanardi, matteo.giovanardi@polito.it

Abstract

Nel settore delle facciate, la transizione ecologica e circolare impone l'adozione di nuovi modelli di business che sfruttino al meglio il valore della materia. In questo contesto, l'Internet of Things (IoT) è identificato quale potenziale driver innovativo per la creazione di mercati dematerializzati. 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 informazioni prodotte e azioni chiave per il raggiungimento dei modelli di business, si evidenziano i potenziali benefici di un sistema di facciata intelligente. La lettura dei risultati offre l'opportunità di immaginare scenari innovativi nella progettazione di componenti edilizi 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 comune da parte delle imprese sia necessaria per una piena comprensione della dimensione culturale riferita al modello circolare. In questo contesto, emerge come le azioni e le politiche di sviluppo europee (EU, 2020), 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 modelli di business circolari (CBM) (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.

Nel settore delle facciate, la domanda generata dagli incentivi per l'efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente (in Italia circa l'85% della domanda) deve confrontarsi con le continue oscillazioni nel costo dell'energia, del gas e delle materie prime (il costo dell'alluminio nell'ultimo anno è cresciuto del 140%) (UNICMI, 2021). Nella prospettiva di una 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 (Ingemarsdotter 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 dipendenza tra CBM e 19 differenti tipologie di informazioni producibili con sistemi IoT integrabili in componenti di involucro. Attraverso l'individuazione di azioni chiave abilitate dall'IoT, 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 cyberfisici e modelli di business alternativi, vengono presentati nella prospettiva di facilitare la transizione ecologica e circolare.

Cinque modelli di business per la transizione circolare (5393/5000)

I CBM sono considerati veicoli di innovazione fondamentali 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 ripensare 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 una maggiore rispondenza a normative e protocolli ambientali influenzando sulla scelta del cliente finale.

Recovery and recycling. Poiché le operazioni di recupero, riuso, e riciclo dei componenti edilizi sono attività centrali nella riduzione del consumo di risorse e produzione rifiuti, è necessario lo sviluppo di nuovi CBM che facilitino la creazione di mercati di seconda mano e rendano 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 flussi circolari. Un caso emblematico è rappresentato dal vetro. Sebbene sia un materiale altamente riciclabile, un report di ARUP denuncia 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 e 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 consente 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 questo senso, il concetto di 'Façade As a Service', un insieme di servizi integrati nel sistema tecnologico, sta emergendo con forza quale alternativa economica e ambientale al modello di vendita tradizionale (Azcarate-Aguerre et al., 2022).

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 o nella creazione di database per la conoscenza del patrimonio costruito e degli interventi di retrofit. In quest'ottica, la creazione di database aperti può determinare una maggiore conoscenza del patrimonio costruito in uso supportando così le teorie di Urban Mining.

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 stakeholder 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.

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 edilizi prefabbricati in modo da tener traccia, attraverso piattaforme BIM, della gestione della commessa e del cantiere da remoto (Chen et al., 2018). 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. Tale approccio risulta particolarmente efficace nelle 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 e orientare differenti processi decisionali. Presenti sul mercato a prezzi limitati, ed estremamente ridotti rispetto al costo del componente 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 (es. vendita dati). 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 start up olandese "Physee - Smart Sustainable Façade"¹ che attraverso l'uso di sensori che individuano l'intensità luminosa integrati nel distanziatore della vetrocamera garantiscono un monitoraggio iperlocale per l'ottimizzazione dei consumi energetici. I secondi, invece, tendono a rispondere a nuovi bisogni. Ad esempio, la maggiore attenzione ai temi della salubrità e qualità dell'ambiente richiede la creazione di dataset ambientali che descrivano in modo più preciso l'interazione tra ambiente costruito e naturale.

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 start up danese WoodSense² 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 SenseTrack³, per il controllo da remoto delle aperture. 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, consentono di tenere traccia di eventuali assestamenti del bene in uso, anticipando così eventuali fenomeni di danneggiamento strutturale.

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, l'informazione digitale, diffusa e accessibile, diviene un prerequisito essenziale per la transizione 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 soggetto ad integrare le tecnologie dell'informazione. Questo è dovuto al fatto che l'estensione della responsabilità del bene nelle fasi di post-vendita richiede un 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. In questa prospettiva, i sensori per il monitoraggio ambientale introducono nuove funzionalità customizzabili. Anche il CBM riguardante l'estensione della vita utile risulta particolarmente influenzato dalla disponibilità di informazioni sul bene. Da un lato, il rapido accesso alle istruzioni per la manutenzione garantirebbe, oltre a risparmi in termini di tempi e costi, una corretta gestione del bene, dall'altro 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 sono, per loro natura, fortemente vincolate dall'uso di strumenti digitali e dalla gestione di grandi moli di dati. In questa prospettiva, lo sviluppo di sistemi cyberfisici abiliterebbe la creazione di feedback necessari 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 incentivi 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 sul bene durante le diverse fasi del processo edilizio, può incrementare il valore economico e ambientale del bene in ottica circolare. 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 rigenerativi 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 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 gestirlo nel modo migliore. Non sembra oggi impossibile pensare che un componente di involucro intelligente possa segnalare al manutentore eventuali patologie in corso, dialogare con l'utente per ottimizzarne il comfort e i consumi energetici, condividere dati su piattaforme urbane riguardo la qualità dell'aria outdoor, o fornire agli investitori feedback sull'efficacia delle loro azioni. 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. 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, chiariscono come l'IoT possa rappresentare un fattore competitivo per le imprese. Così, come la tecnologia (quella hard) ci ha spinto verso il modello lineare, ora la tecnologia (digitale) può trainarci verso nuovi modelli più sostenibili.

Note

1. <https://www.physee.eu/sense/sense-by-physee>
2. <https://www.woodsense.com>

3. <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 (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. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2018.02.001>.
- Bressanelli, G., Adrogegari, F., Perona, M. and Sacconi, N. (2018), “Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies”, *Sustainability*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030639>.
- 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. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1379095>
- European Commission (2020), “A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe”. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN> (Accessed on 31/08/2022)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
- 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, 130395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130395>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105047>.
- 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 (Accessed on 31/08/2022)

Didascalie immagini

Fig. 01 - Tag NFC identificabili con smartphone

Fig. 02 - Principali parametri ambientali monitorabili con sistemi IoT integrati in facciata

Fig. 03 - Principali parametri sul prodotto monitorabili con sistemi IoT integrati in facciata

Fig. 04 - La matrice evidenzia la relazione tra CBM e informazioni prodotte con l'IoT

Just Accepted Article