

ARTICLE INFO

Received	10 September 2024
Revised	12 October 2024
Accepted	14 October 2024
Published	30 December 2024

PROGETTARE BIPV

Strategie per gestire la complessità del fotovoltaico integrato in facciata

DESIGNING BIPV

Strategies for managing complexity in the integration of photovoltaics in facades

Matteo Giovanardi, Claudio Castellan, Marcello La Rosa, Aleksandar Pavlovic, Alessandro Pracucci

ABSTRACT

I recenti Piani Europei per l'energia e il clima promuovono l'adozione di sistemi Building Integrated Photovoltaics (BIPVs) quali tecnologie chiave per affrontare le molteplici sfide associate alla neutralità climatica. Sebbene i progressi ottenuti nel campo delle tecnologie fotovoltaiche offrano prospettive incoraggianti in termini di efficienza e durabilità, l'integrazione in componenti edilizi rappresenta ancora una pratica complessa e non comune. Con l'obiettivo di affrontare il tema della complessità in relazione alla progettazione di sistemi BIPV e favorirne una maggiore commercializzazione, l'articolo offre una serie di strategie progettuali per affrontare questioni di natura architettonica, tecnologica, economica e ambientale attraverso l'analisi critica di un caso studio reale.

Recent European plans for energy and climate promote the adoption of Building Integrated Photovoltaics (BIPVs) as key technologies to address the diverse challenges associated with climate neutrality. Although advancements in photovoltaic technology offer promising perspectives in terms of efficiency and durability, integrating these technologies into building components remains a complex and uncommon practice. Aiming to address the complexities related to BIPV system design and encourage broader commercialisation, this article presents a series of design strategies to tackle architectural, technological, economic, and environmental issues through a critical analysis of a real-world case study.

KEYWORDS

BIPV, sistemi di facciata, energia rinnovabili, innovazione, complessità

BIPV, facade systems, renewable energy, innovation, complexity

Matteo Giovanardi, Architect and PhD, is a co-Founder of Livery Srl Società Benefit (Italy), an innovative startup aiming to accelerate the impact of scientific research in the construction sector. His studies and work focus on the enabling role of digital technologies in promoting the principles of the Circular Economy and Sustainability in the built environment. Mob. +39 339/601.03.39 | E-mail: m.giovanardi@livery.it

Claudio Castellan, PhD in Physics, is the Product Manager and CEO of Glass to Power (Italy). E-mail: claudio.castellan@glasstopower.com

Marcello La Rosa, PhD in Chemistry, is the Head of Research and Development at Glass to Power (Italy). E-mail: marcello.larosa@glasstopower.com

Aleksandar Pavlovic is the Operations Manager at the Glass to Power (Italy), where he coordinates product industrialisation activities and project management. E-mail: aleksandar.pavlovic@glasstopower.com

Alessandro Pracucci, Architect and PhD, is a co-Founder and Director of Livery Srl Società Benefit (Italy), an innovative startup aiming to accelerate the impact of scientific research in the construction sector. He is an Adjunct Professor in Architectural Technology at the University of Bologna and a Member of the International PhD Board in Architecture and Urban Planning at the University of Ferrara. E-mail: a.pracucci@livery.it



Edgar Morin (2017, p. 27), filosofo, sociologo e teorico della 'complessità', descrive quest'ultima come lo stato di confusione di un individuo davanti a un «[...] oggetto che comporta troppi tratti diversi, troppe molteplicità e indistinzioni interne». La difficoltà nel comprendere e descrivere le relazioni tra parti che avvengono all'interno di un sistema, incluso la variabilità delle influenze reciproche che si verificano nel tempo (Manni and Valzano, 2023), determina così un'esplicita criticità nell'adottare i principi di separabilità, riduzione e semplificazione necessari per affrontare e risolvere un problema in modo empirico.

Nel dibattito architettonico attuale, a fronte del processo di ibridazione con tecnologie e approcci tipici della produzione industriale (Schiaffonati, 2014; Mussinelli, Tartaglia and Di Paquale, 2017; Zaffagnini and Morganti, 2022) e l'affermarsi di compenetrazioni disciplinari (Faroldi, 2021), il termine 'complesso' viene sempre più spesso associato a sistemi tecnologici che integrano più componenti e funzioni, richiedendo, per essere progettati e gestiti nel loro ciclo di vita, competenze trasversali al dominio dell'architettura. Questo si manifesta in modo chiaro nel campo dei Building Integrated Photovoltaics (BIPVs), sistemi tecnologici avanzati che implicano conoscenze specifiche nel campo delle tecnologie fotovoltaiche e della gestione dell'energia.

Un prodotto BIPV rappresenta la più piccola unità elettricamente e meccanicamente indivisibile di un sistema fotovoltaico integrato nell'edificio (D'Amrosio et alii, 2020) in grado di combinare le funzionalità di un componente edilizio con la produzione di energia elettrica (EN 50583-1:2016; IEA, 2018). Nel contesto attuale, i Piani Europei per l'energia e il clima come Fit for 55 (European Commission, 2021) e REPowerEU (European Commission, 2022) identificano i sistemi BIPV quali tecnologie chiave nel perseguire l'autosufficienza energetica (Chiaroni, Chiesa and Frattini, 2019) e la neutralità climatica dell'ambiente costruito (Moser and Maturi, 2022; Bizzarri, Moser and Mazzer, 2020).

Se negli ultimi trent'anni il tema della complessità in relazione allo sviluppo dei sistemi BIPV è stato affrontato da un punto di vista tecnologico prestazionale (Jakica, 2018; Bonomo and Frontini, 2024) con risultati significativi in termini di integrazione fisica e funzionale (Figg. 1-3), persistono ancora elementi che ne ostacolano la diffusione sul mercato. I costi elevati di produzione, la difficile standardizzazione, questioni di natura estetica e la mancanza di una filiera produttiva e distributiva adeguatamente strutturata per integrare prodotti integrati rappresentano i principali deterrenti per un'adozione su larga scala dei prodotti BIPV (Prieto et alii, 2017; Curtius, 2018; Weerasinghe et alii, 2021; Bonomo et alii, 2024); emerge pertanto la necessità primaria di aggiornare strumenti, metriche e approcci metodologici utilizzati per affrontare lo sviluppo di sistemi integrati complessi (Sposito and De Giovanni, 2023) a favore di una maggiore scalabilità sul mercato (Corti, Follo and Bonomo, 2024).

Sulla base di queste premesse l'articolo mira a identificare strategie chiave nella gestione della complessità per lo sviluppo di un sistema di facciata continua che integra un componente BIPV attraverso l'analisi critica di attività di ricerca, prototipazione e validazione sul mercato. L'articolo propone una serie di riflessioni sulle fasi di progettazione, produzione e gestione nel ciclo di vita del sistema BIPV, indagando aspetti di natura architettonica, tecnologica, economica e ambientale all'interno di una pro-

spettiva volta a promuovere il processo di transizione energetica attraverso l'innovazione e il design (Giallocosta, 2019). Il tema della complessità, quale aspetto caratteristico nella progettazione di sistemi integrati e multifunzionali, viene così affrontato con l'obiettivo generale di rinnovare l'interesse di ricercatori, progettisti e attori nel mercato delle costruzioni verso lo sviluppo di sistemi innovativi per l'ambiente costruito.

Metodologia e fasi della ricerca | La ricerca, condotta all'interno del progetto 'Mass Customization 2.0 for Integrated PV' (MC 2.0)¹, adotta un approccio sistemico e multilivello per gestire la complessità della concettualizzazione e ingegnerizzazione di sistemi BIPV nelle chiusure verticali esterne, con un focus specifico sui sistemi di facciata continua; la metodologia si articola in quattro fasi consequenziali e interconnesse, ciascuna volta ad affrontare uno specifico aspetto nella progettazione di un sistema BIPV.

La prima fase consiste nell'analisi del sistema tecnologico di facciata e la sua scomposizione in sottosistemi (Knaack et alii, 2007; Fig. 4); questa fase, utilizzando il metodo gerarchico-funzionale per mappare le relazioni tra i vari sottosistemi e le loro funzioni primarie, consente di identificare le potenziali integrazioni di componenti fotovoltaiche nel sistema tecnologico preservando l'integrità funzionale del sistema edilizio. Parallelamente si procede allo studio del sistema fotovoltaico per identificarne gli elementi chiave dell'architettura quali celle fotovoltaiche, sistemi di cablaggio e connettori (Fig. 5) e, sulla base degli Standard Internazionali IEC 61730-1:2016 e IEC 63092-1:2020, potenziali conflitti o sinergie tra i requisiti costruttivi dei moduli fotovoltaici e il sistema di facciata vengono valutati da un punto di vista fisico e funzionale (van Noord, 2023).

La terza fase metodologica, sulla base delle normative UNI 8289:1981 e UNI 11277:2008, è finalizzata a definire i requisiti esigenziali-prestazionali dello specifico sistema di facciata BIPV: tale azione, propedeutica alla fase di progettazione, stabilisce i requisiti primari del sistema tecnologico integrato e tramuta indicazioni teoriche in vincoli progettuali ordinati per rilevanza. Infine la quarta fase procede nella progettazione del sistema BIPV; l'integrazione dei vari componenti viene valutata tramite prototipi virtuali e fisici in grado di verificare la fattibilità tecnica del progetto e validare le assunzioni teoriche emerse dalle fasi precedenti.

Sebbene l'obiettivo dell'articolo sia volto a far emergere aspetti di complessità relativi all'integrazione di un vetro fotovoltaico in un sistema di facciata continua, l'approccio metodologico proposto può essere adottato per lo sviluppo di più sistemi BIPV.

Il caso studio | Sviluppato all'interno del progetto MC 2.0, il caso di studio ha interessato la progettazione di un sistema di facciata continua che integra un vetro fotovoltaico BIPV brevettato da Glass to Power²: nello specifico, il prodotto BIPV è un'unità di vetro isolante fotovoltaico trasparente a tre lastre (PV-IGU) basata sulla tecnologia Quantum Dot-Luminescent Solar Concentrator (QD-LSC; Meinardi et alii, 2024). Il suo funzionamento prevede la sostituzione del vetro centrale di un triplo vetrocamera con una lastra in polimetilmetacrilato (PMMA) che, incorporando nanoparticelle ibride inorganiche, guida la radiazione solare fino al perimetro del vetrocamera dove i moduli fotovoltaici a base di silicio integrati nel giunto silconico convertono il fascio luminoso in energia elettrica (Fig. 6). La tecnologia pre-

vede che i moduli fotovoltaici siano completamente integrati nel bordo del vetrocamera evitando così la loro percezione visiva e preservando l'omogeneità della superficie vetrata (Figg. 7-11).

L'integrazione del PV-IGU in un sistema di facciata continua introduce un ulteriore livello di complessità, dovuto alle interazioni con altri componenti e sistemi tecnologici, alle implicazioni dirette sul processo di produzione e installazione e alla necessità di garantire le prestazioni dell'intero sistema. A questo proposito, specifici requisiti architettonici, tecnologici, economici e ambientali (Tab. 1), emersi dall'analisi esigenziale-prestazionale, sono stati definiti considerando le implicazioni di ogni scelta sull'intero ciclo di vita del componente BIPV. In quest'ottica la complessità si manifesta nel trovare il giusto bilanciamento tra i requisiti progettuali emersi, considerando che le istanze estetiche devono essere valutate alla pari di quelle funzionali prestazionali per favorire la diffusione sul mercato (Frontini et alii, 2022).

Nel progetto MC 2.0 l'indagine progettuale è stata guidata dalla volontà di sviluppare un involucro tecnologicamente integrato con il fotovoltaico simile, per caratteristiche estetiche, architettoniche e funzionali, ai sistemi di facciata continua convenzionali. Aspetti dimensionali, scale cromatiche, proprietà termiche e ottiche (trasmissione luminosa, fattore solare, riflettanza e trasparenza) sono state indagate al fine di validare la versatilità del modulo PV-IGU alle caratteristiche architettoniche richieste dal mercato e alle relative implicazioni sulla produzione di energia elettrica.³

Affrontati gli aspetti di natura architettonica e resa energetica, lo studio si è focalizzato sull'integrazione fisica che, pur essendo un tema tecnologicamente praticabile e già affrontato in letteratura (Rounis, Athienitis and Stathopoulos, 2021; Alvarez-Alava et alii, 2023; Chen et alii, 2023), implica una serie di riflessioni aggiuntive volte a garantire la scalabilità del sistema BIPV lungo l'intero ciclo di vita.

Nello specifico, l'inserimento del connettore (c.d. junction box) e il passaggio di cavi elettrici risultano ancora oggi le parti più delicate da gestire durante la fase di progettazione in quanto hanno implicazioni dirette sul processo di assemblaggio e installazione, nonché sul costo complessivo del sistema BIPV (Figg. 12, 13). Con l'obiettivo di garantire la qualità del prodotto finale lungo l'intero processo di produzione e manutenzione del BIPV, il progetto ha affrontato le diverse fasi di realizzazione e gestione della facciata secondo una logica di industrializzazione. In particolare, il sistema di facciata continua BIPV è stato progettato per ottimizzare le lavorazioni e le sigillature sui profili del sistema di facciata, ridurre il numero di operazioni durante la produzione del sistema BIPV, assicurare la qualità nelle fasi di produzione off-site, garantire l'operatività e facilitare la manutenzione e la sostituzione nel tempo.

Un primo elemento di complessità ha riguardato l'integrazione della junction box, considerato il limitato spazio disponibile nei sistemi di facciata; la ricerca di mercato si è concentrata su connettori di dimensioni ridotte, integrabili nel giunto silconico del vetrocamera o in diretta adiacenza per occupare lo spazio tra vetrocamera e profili di facciata. La scelta è ricaduta su una tecnologia che consentisse di limitare le interferenze fisiche indipendentemente dal sistema di facciata adottato e garantisse la facilità di assemblaggio agli operatori. Un'ulteriore analisi ha riguardato la predisposizione dei cavi elettrici in officina con la possibilità di collegare ogni modulo



Fig. 1 | BIPV prototypes developed by the Institute for Applied Sustainability in the Built Environment research group at SUPSI (credit: SUPSI, 2021).

Fig. 2 | ASCA solar modules, BIPV integration in an office building (credit: MB Werbefotografie, 2023).

Fig. 3 | AGC Technovation Center, BIPV in double skin facade (credit: AGC, 2014).

Next page

Fig. 4 | Identification of the main components of a curtain wall façade system (credit: M. Giovanardi, 2024).

Fig. 5 | Glass module BIPV architecture (credit: M. Giovanardi, 2024).



durante la fase di vetrazione. Tale approccio consente di limitare i tempi di installazione in cantiere e garantire livelli di qualità delle sigillature più elevate, aspetto cruciale nel preservare la tenuta all'acqua del sistema di facciata una volta in uso.

Lo spazio limitato per il posizionamento della junction box e una maggior difficoltà nella gestione dei cavi elettrici durante le fasi di manutenzione e riparazione determinano la necessità di esplorare anche nuove forme di trasferimento dell'elettricità, attraverso l'uso di pin, sistemi di induzione magnetica o laser, sfide tecnologiche queste investigate in altri contesti industriali.

Strategie di gestione della complessità | L'elevato numero di requisiti da dover considerare e soddisfare, unito alla multidisciplinarietà dei temi trattati, determina un livello di complessità maggiore rispetto allo sviluppo di componenti edilizi tradizionali: per far fronte a questo problema sono state adottate diverse strategie di gestione e mitigazione della complessità. Un 'approccio sistemico e integrato' consente di considerare il sistema BIPV come un sistema di relazioni fisico-funzionali, in cui ogni componente deve essere progettato considerando l'influenza generata sulla globalità del sistema e delle sue prestazioni. Fin dalle prime fasi progettuali le analisi di compatibilità tra sistemi e materiali risultano cruciali per lo sviluppo di interfacce tra i diversi componenti, come le lavorazioni dei profili per il passaggio dei cavi elettrici o il posizionamento dei connettori per favorire le fasi assemblaggio, installazione e manutenzione, analisi che devono includere aspetti relativi alle attività lungo l'intero processo produttivo riducendo, laddove possibile, le interferenze tra attività.

I principi del 'design modulare e circolare' possono determinare significativi benefici in termini di costi e risorse impiegate: se la modularità del componente BIPV da un lato abilita la produzione in serie a costi ridotti aumentandone la scalabilità sul mercato, dall'altro è una caratteristica imprescindibile per abilitare schemi di gestione razionali e circolari. La modularità dei sistemi BIPV, applicabile alle componenti fotovoltaiche e di facciata, può facilitare schemi di manutenzione, riparazione e riutilizzo del bene lungo l'intera vita utile del componente edilizio risolvendo così questioni relative alla diversa vita utile



delle tecnologie integrate; per questo risulta cruciale progettare sistemi integrati per parti che possano essere facilmente sostituite senza compromettere la funzionalità dell'intero sistema edilizio.

Un 'approccio low-tech' che privilegi soluzioni tecnologiche semplici, affidabili, scalabili e ampiamente validate (Fagnoni and Olivastri, 2019) riduce la necessità di manodopera specializzata lungo la filiera e la frequenza di guasti nei sistemi in uso con effetti significativi sul costo del prodotto BIPV. La semplificazione delle fasi di assemblaggio, installazione e configurazione attraverso approcci plug-and-play richiede un'attenzione progettuale elevata; con l'obiettivo di ridurre al minimo gli interventi di tecnici specializzati e le infrastrutture a supporto delle attività di installazione, il sistema di facciata BIPV deve essere progettato per essere posato e cablato in serie, seguendo lo schema di installazione del sistema di facciata.

Una progettazione 'future-proof' con sistemi flessibili e adattabili ai cambiamenti futuri, siano essi climatici o nelle modalità di utilizzo del bene, garantisce una maggiore durabilità della tecnologia e delle sue prestazioni. Principi di progettazione relativi alla razionalità dei suoi componenti, al corretto dimensionamento delle sue parti, alla scelta dei materiali e alla loro obsolescenza programmata offrono maggiori vantaggi in termini di vita utile del sistema BIPV e della resa energetica. L'adozione di strumenti di valutazione LCA, LCC e di simulazione energetica, consentendo di valutare l'impatto di materiali e fenomeni esterni nel ciclo di vita del prodotto, possono supportare i progettisti in analisi multicriteria complesse.

Infine una 'progettazione multidisciplinare' attraverso il coinvolgimento di professionisti con know-how specifici nel mondo della progettazione architettonica, dei sistemi tecnologici di involucro e delle tecnologie fotovoltaiche favorisce lo sviluppo di soluzioni innovative che possano rispondere alla domanda del mercato, trovando il giusto compromesso tra prestazioni energetiche, fattibilità tecnica, sostenibilità economica e ambientale.

Conclusioni e prospettive future | L'evoluzione del quadro normativo europeo e nazionale, con l'introduzione di target più stringenti per il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 (European Commission, 2021), ha portato a un rinnovato interesse verso le tecnologie BIPV. I benefici indotti dall'integrazione di tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili nell'ambiente costruito ampliano le prospettive di intervento nella rigenerazione di città energeticamente indipendenti. In questo contesto il presente articolo si è posto l'obiettivo di fornire un con-

tributo alla definizione di strategie per la gestione della complessità nella progettazione di sistemi BIPV al fine di favorirne maggiore scalabilità sul mercato.

L'analisi critica di un caso studio relativo allo sviluppo di un sistema di facciata BIPV ha evidenziato gli aspetti più critici emersi durante il processo di progettazione. Attraverso una metodologia articolata in più fasi, scalabile a più componenti edilizi, sono state definite una serie di strategie per la gestione e mitigazione della complessità nello sviluppo di un sistema di facciata continua BIPV, promuovendo un approccio sistemico che consideri simultaneamente gli aspetti architettonici, tecnologici, economici ed ambientali del sistema.

Dal quadro proposto emerge come il design sia fondamentale nella progettazione di componenti integrati dovendo comprendere e mappare quelle che sono le implicazioni tecnologiche, economiche e ambientali nel ciclo di vita del prodotto BIPV. Ad acuire tale complessità concorre l'assenza di una filiera produttiva adeguata alla fornitura di componenti fotovoltaiche specifiche per prodotti BIPV. Infatti, mentre il settore fotovoltaico ha raggiunto una sua maturità industriale, ulteriori progressi sono necessari nello sviluppo di componenti BIPV per l'architettura quali junction box di dimensioni contenute, celle fotovoltaiche sottili e soluzioni alternative alla trasmissione dell'energia via cavo (es. induzione o radiazione elettromagnetica).

In aggiunta è necessario segnalare la necessità di standard e certificazioni di prodotto omogenei per sistemi integrati che aiutino a risolvere lo sviluppo di soluzioni innovative per migliorare la resa energetica di celle fotovoltaiche e tecnologie QD-LSC, elementi questi che contribuirebbero a una rapida accelerazione nella diffusione di tecnologie BIPV e al raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica per l'ambiente costruito.

Edgar Morin (2017), philosopher, sociologist, and theorist of 'complexity', describes complexity as the confusion one faces before an object that comprises too many different traits, too much multiplicity, and internal indistinction. The challenge of understanding and describing the relationships between parts within a system, including the variability of mutual influences over time (Manni and Valzano, 2023), thus creates a clear obstacle to applying principles of separability, reduction, and simplification needed to address and solve a problem empirically.

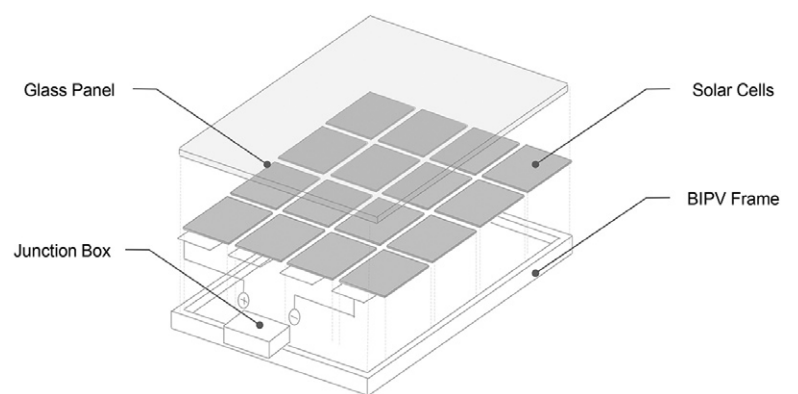
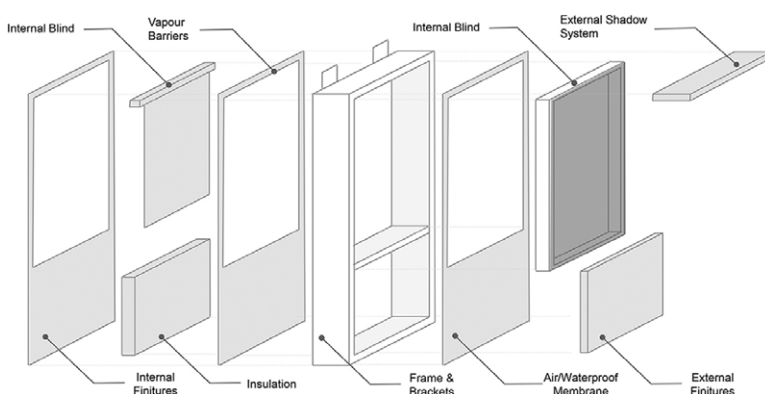
In the current architectural debate, amid a process of hybridisation with technologies and approaches typical of industrial production (Schiaffonati, 2014;

Mussinelli, Tartaglia and Di Pasquale, 2017; Zaffagnini and Morganti, 2022) and the emergence of disciplinary interpenetrations (Faroldi, 2021), the term 'complex' is increasingly associated with technological systems that integrate multiple components and functions. Expertise beyond traditional architecture is required to design and manage these systems throughout their lifecycle. This is especially evident in Building Integrated Photovoltaics (BIPVs), advanced technological systems that demand specific knowledge in photovoltaic technologies and energy management.

A BIPV product represents the smallest electrically and mechanically indivisible unit of a building-integrated photovoltaic system (D'Ambrosio et alii, 2020) capable of combining the functionality of a building component with electricity generation (EN 50583-1:2016; IEA, 2018). In the current context, European energy and climate plans such as Fit for 55 (European Commission, 2021) and REPowerEU (European Commission, 2022) identify BIPV systems as key technologies in pursuing energy self-sufficiency (Chiaroni, Chiesa and Frattini, 2019) and the climate neutrality of the built environment (Moser and Maturi, 2022; Bizzari, Moser and Mazzer, 2020).

While over the past thirty years, the topic of complexity concerning BIPV system development has been addressed from a performance technology perspective (Jakica, 2018; Bonomo and Frontini, 2024) with significant progress in physical and functional integration (Figg. 1-3), barriers to market diffusion persist. High production costs, difficulties in standardisation, aesthetic concerns, and a lack of a sufficiently structured production and distribution chain to integrate BIPV products are the primary deterrents to large-scale adoption (Prieto et alii, 2017; Curtius, 2018; Weerasinghe et alii, 2021; Bonomo et alii, 2024). This highlights the need to update tools, metrics, and methodological approaches to support the development of complex integrated systems (Spisito and De Giovanni, 2023) promoting greater market scalability (Corti, Follo and Bonomo, 2024).

Based on these premises, this article aims to identify key strategies for managing complexity in the development of a continuous façade system integrating a BIPV component through critical analysis of research activities, prototyping, and market validation. The article presents a series of reflections on the design, production, and lifecycle management phases of BIPV systems, exploring architectural, technological, economic, and environmental aspects with a perspective aimed at promoting the energy transition process through innovation and design (Giallocosta, 2019). The theme of complexity, as a characteristic element in the design of integrated and multifunctional systems, is thus addressed with the goal



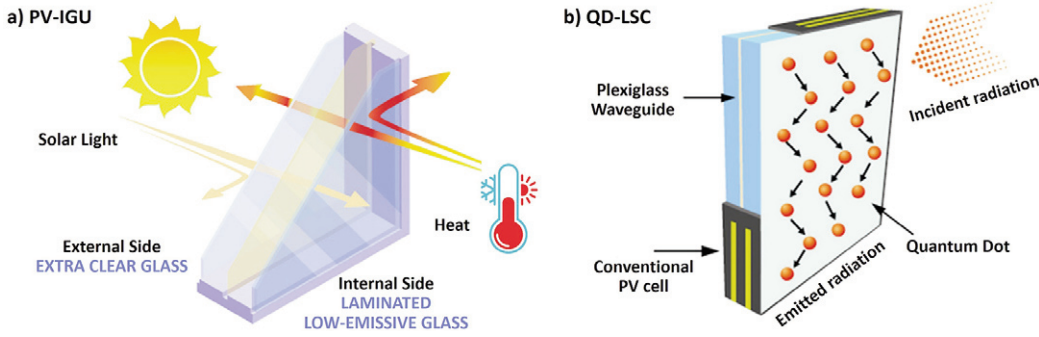
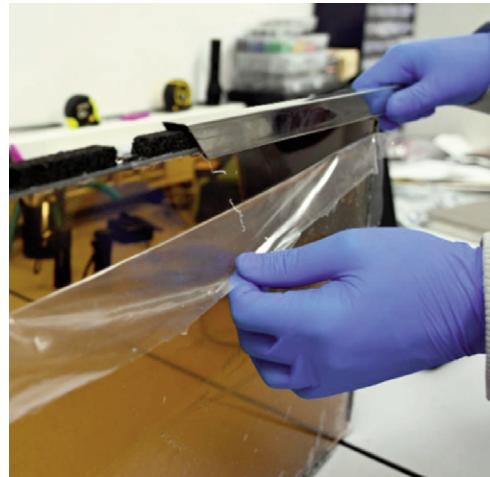
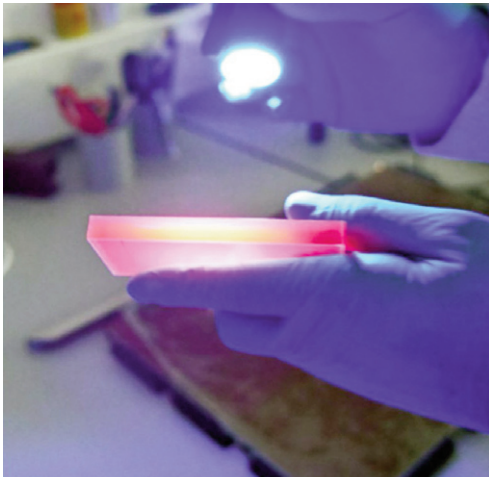


Fig. 6 | Functioning of PV-IGU technology (credit: G2P, 2022).

Fig. 7-11 | Details of the development and production of Glass to Power's PV-IGU module (credits: G2P, 2024).

Next page

Tab. 1 | BIPV requirements list considered during the project (credit: the Authors).



of renewing the interest of researchers, designers, and stakeholders in the construction market toward developing innovative systems for the built environment.

Methodology and research phases | The research, conducted as part of the 'Mass Customization 2.0 for Integrated PV' (MC 2.0) project¹, adopts a systemic and multi-level approach to manage the complexity of conceptualising and engineering BIPV systems in vertical external enclosures, with a specific focus on continuous façade systems. The methodology is divided into four sequential and interconnected phases, each addressing a specific aspect of BIPV system design.

The first phase involves analysing the façade technology system and breaking it down into subsystems (Knaack et alii, 2007; Fig. 4). This phase uses the hierarchical-functional method to map relationships between the various subsystems and their primary functions, enabling the identification of potential photovoltaic component integrations within the technological system while preserving the functional integrity of the building system. Concurrently, the photovoltaic system is studied to identify its key architectural elements, such as photovoltaic cells, wiring systems, and connectors (Fig. 5). Based on International Standards IEC 61730-1:2016 and IEC 63092-1:2020, potential conflicts or synergies between the construction requirements of photovoltaic modules and the façade system are evaluated from both physical and functional perspectives (van Noord, 2023).

The third methodological phase, based on UNI 8289:1981 and UNI 11277:2008 standards, aims to define the performance requirements for the specific BIPV façade system. This action, preparatory to the design phase, establishes the primary requirements of the integrated technology system and translates theoretical guidelines into project constraints ordered by relevance. Finally, the fourth phase proceeds with the design of the BIPV system; the integration of various components is evaluated through virtual and



physical prototypes to verify the project’s technical feasibility and validate the theoretical assumptions from the previous phases.

Although the article’s objective is to highlight complexity aspects related to the integration of photovoltaic glass into a continuous façade system, the proposed methodological approach can be adopted to develop multiple BIPV systems.

The case study | Developed within the MC 2.0 project, the case study involved the design of a continuous façade system integrating a patented BIPV photovoltaic glass by Glass to Power². Specifically, the BIPV product is a transparent triple-pane photovoltaic insulating glass unit (PV-IGU) based on Quantum Dot-Luminescent Solar Concentrator (QD-LSC) technology (Meinardi et alii, 2024). Its operation involves replacing the central pane of a triple-pane glass unit with a polymethylmethacrylate (PMMA) sheet that, incorporating hybrid inorganic nanoparticles, guides solar radiation to the edge of the glass unit, where silicon-based photovoltaic modules integrated into the silicone joint convert the light beam into electrical energy (Fig. 6). The technology ensures that photovoltaic modules are fully integrated into the glass edge, avoiding visual perception and preserving the homogeneity of the glass surface (Fig. 7-11).

Integrating the PV-IGU into a continuous façade system introduces an additional level of complexity due to interactions with other components and technological systems, direct implications for production and installation processes, and the need to ensure the overall system’s performance. In this regard, specific architectural, technological, economic, and environmental requirements (Tab. 1), derived from performance requirement analysis, were defined by considering the implications of each choice on the entire lifecycle of the BIPV component. From this perspective, complexity manifests in finding the right balance among the design requirements that have emerged, considering that aesthetic criteria must be evaluated on par with functional performance criteria to facilitate market adoption (Frontini et alii, 2022).

In the MC 2.0 project, the design investigation was driven by the goal of developing an envelope technologically integrated with photovoltaics that, in terms of aesthetic, architectural, and functional characteristics, resembles conventional continuous façade systems. Dimensional aspects, colour scales, and thermal and optical properties (light transmission, solar factor, reflectance, and transparency) were examined to validate the versatility of the PV-IGU module in meeting the architectural characteristics demanded by the market and its implications for electricity production.³

After addressing architectural and energy performance aspects, the study focused on physical integration, which, while technically feasible and addressed in the literature (Rounis, Athienitis and Stathopoulos, 2021; Alvarez-Alava et alii, 2023; Chen et alii, 2023), requires additional considerations to ensure the scalability of the BIPV system over its lifecycle.

Specifically, inserting the connector (junction box) and routing electrical cables remain delicate during the design phase due to their direct impact on assembly and installation processes, as well as the overall cost of the BIPV system (Fig. 12, 13). To ensure the quality of the final product throughout the entire production and maintenance process, the project addressed the various stages of façade construction and management according to an industrialisation logic. In particular, the BIPV continuous façade system was designed to optimise operations and sealing on façade profiles, reduce the number of steps during BIPV production, ensure quality in off-site production stages, maintain operability, and facilitate maintenance and replacement over time.

A primary challenge was integrating the junction box, given the limited space in façade systems; market research focused on smaller connectors that could be incorporated into the silicone joint of the glass unit or placed near the space between the glass unit and façade profiles. A technology was chosen that minimises physical interference regardless of the façade system used and ensures easy assembly for operators. Further analysis involved preparing the electri-

cal cables in the workshop, with the possibility of connecting each module during the glazing phase. This approach limits on-site installation time and ensures higher quality seals, which is crucial for preserving the water tightness of the façade system once in use.

The limited space for junction box placement and the increased difficulty in managing electrical cables during maintenance and repair phases underscore the need to explore new forms of electricity transfer, including pins, magnetic induction, or laser systems, technological challenges being studied in other industrial contexts.

Strategies for managing complexity | The high number of requirements to be considered and met, combined with the multidisciplinary nature of the topics, creates a higher level of complexity compared to developing traditional building components. To address this issue, various complexity management and mitigation strategies were adopted.

A ‘systemic and integrated approach’ allows the BIPV system to be considered a system of physical-functional relationships, where each component must be designed considering its influence on the system’s overall performance. From the early design phases, compatibility analyses between systems and materials are crucial for developing interfaces between components, such as profile processing for electrical cable routing or connector positioning to facilitate assembly, installation, and maintenance phases. These analyses should cover activities across the entire production process, reducing interference between activities wherever possible.

The principles of ‘modular and circular design’ can yield significant benefits in terms of cost and resources used. The modularity of the BIPV component enables cost-effective series production, increasing its scalability in the market, while also allowing rational and circular management schemes. The modularity of BIPV systems, applicable to photovoltaic and façade components, facilitates maintenance, repair, and reuse schemes over the entire useful life of the building component, addressing issues related to the

Type	Requirements	Objectives	Parameters
Architectural	Aesthetic	Meeting building architectural needs	Transparency, colour, reflectance, etc.
	Design integration	Ensuring systems compatibility	Fixing, cable routing, weight-load, etc.
	Architectural layout	Fitting architectural	Dimension, orientations, solar exposition, etc.
Technological	Production & Manufacturing	Reducing and facilitating operations	Mountability, accessibility, plug-and-play installation, etc.
	Building performance	Ensuring façade performance	Thermal, acoustic, water/air tightness, etc.
	BIPV management	Facilitating building management	Maintenability, reparability, updatability, etc.
	Service life	Ensuring BIPV durability	Lifespan, reparability, technological upgradability, etc.
	End of life	Ensuring BIPV disassembly	Recycle, reuse and repurpose of components
Economic	Product cost	Maintaining costs similar to conventional	Cost per product, extra costs
	Investment	Guaranteeing a short payback time	Return of Investment, Life Cycle Cost
	Embedded value	Enhancing building property value	Product added value
Environmental	Carbon neutrality	Reducing overall carbon emission	CO ₂ emission, Embodied Carbon, Embodied Energy, etc.
	Renewable energy	Reducing overall energy demand	BIPV efficiency, energy production, etc.
	Circularity	Embracing CE principles	Recyclability, reusability, reparability, etc.
	Climate change	Adapting and mitigating	Effect on UHI, raw materials consumption, etc.
	Comfort & Wellbeing	Enhancing comfort and wellbeing	Air quality, outdoor comfort, visual comfort, etc.

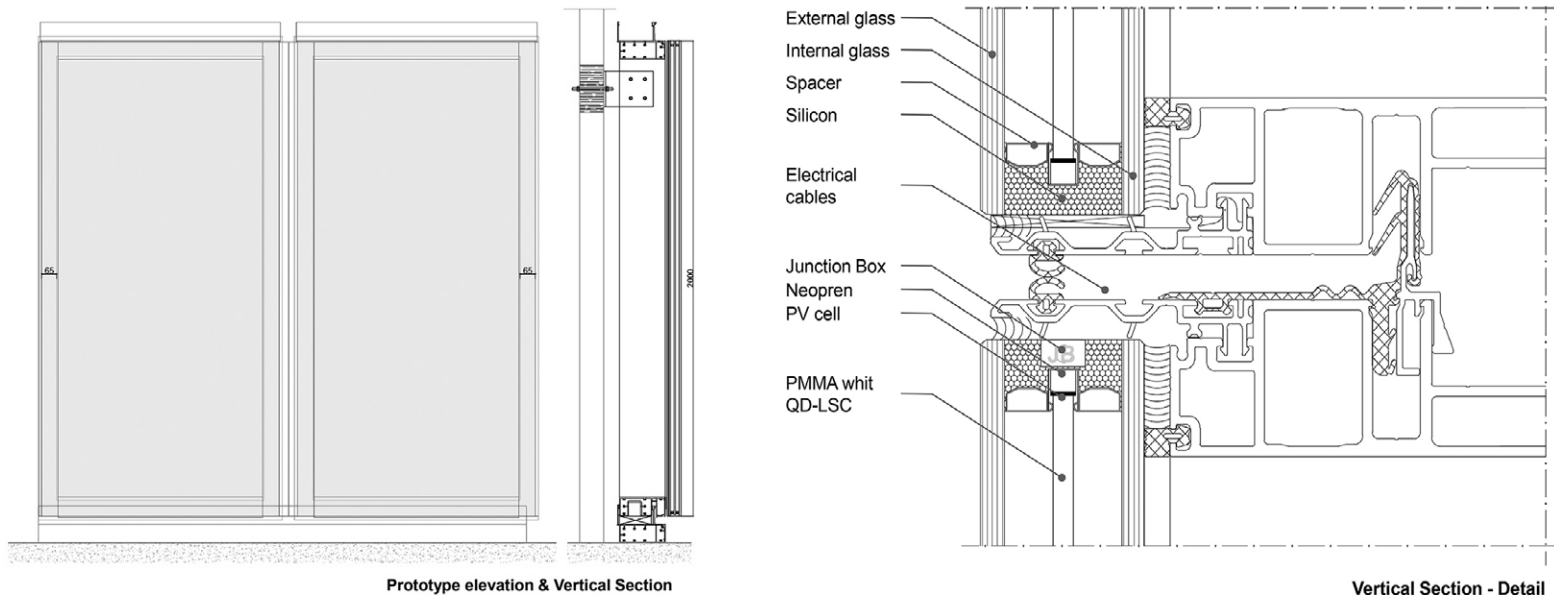


Fig. 12, 13 | Drawing of integration of BIPV in curtain wall façade (credits: Levery, 2024).

varying lifespans of integrated technologies. Therefore, it is crucial to design integrated systems with parts that can be easily replaced without compromising the functionality of the entire building system.

A 'low-tech approach' favouring simple, reliable, scalable, and widely validated technological solutions (Fagnoni and Olivastri, 2019) reduces the need for specialised labour throughout the supply chain and decreases system failure frequency in use, with significant effects on the BIPV product's cost. Simplifying assembly, installation, and configuration phases with plug-and-play approaches requires careful design. To minimise the need for specialised technicians and support infrastructure during installation, the BIPV façade system should be designed to be installed and wired in series, following the façade system's installation scheme.

'Future-proof design', with flexible and adaptable systems to accommodate future changes, whether environmental or in the asset's usage, ensures greater durability of the technology and its performance. Design principles related to component rationality, proper sizing of parts, material selection, and planned obsolescence offer more advantages regarding the BIPV system's useful life and energy output. Using LCA, LCC, and energy simulation tools to assess the impact of materials and external phenomena on the product's lifecycle can support designers in conducting complex multicriteria analyses. Finally, a 'multi-

disciplinary design' approach involving professionals with specific expertise in architectural design, technological envelope systems, and photovoltaic technologies promotes the development of innovative solutions that meet market demand, balancing energy performance, technical feasibility, and economic and environmental sustainability.

Conclusions and future perspectives | The evolution of European and national regulatory frameworks, with the introduction of stricter targets to achieve climate neutrality by 2050 (European Commission, 2021), has renewed interest in BIPV technologies. The benefits of integrating renewable energy production technologies into the built environment expand the potential for interventions in creating energy-independent cities. In this context, the present article aims to contribute to defining strategies for managing complexity in BIPV system design to enhance its scalability in the market.

A critical analysis of a case study on the development of a BIPV façade system highlighted the most critical aspects encountered during the design process. Through a multi-phase methodology, applicable to various building components, a series of strategies were defined for managing and mitigating complexity in the development of a continuous BIPV façade system. This promotes a systemic approach that simultaneously considers the system's architectural,

technological, economic, and environmental aspects. The proposed framework underscores the importance of design in creating integrated components, as it must encompass and map the technological, economic, and environmental implications across the BIPV product lifecycle. Adding to this complexity is the lack of an adequate production chain for supplying photovoltaic components designed specifically for BIPV products. While the photovoltaic sector has reached industrial maturity, further progress is needed in developing BIPV-specific architectural components such as compact junction boxes, thin photovoltaic cells, and alternative solutions for power transmission (e.g., induction or electromagnetic radiation).

Moreover, standardised and consistent product certifications for integrated systems are needed to facilitate the development of innovative solutions to improve energy efficiency in photovoltaic cells and QD-LSC technologies, which would accelerate the adoption of BIPV technologies and contribute to achieving climate neutrality targets for the built environment.

Acknowledgements

This paper results from the collective input of the Authors. However, the introductory paragraph is attributed to M. Giovanardi, 'Methodology and research phases' to A. Pracucci, 'The case study' to A. Pracucci, C. Castellan, M. La Rosa, and A. Pavlovic, 'Strategies for managing complexity' to M. Giovanardi and A. Pracucci, and the paragraph 'Conclusions and future perspectives' to M. Giovanardi and A. Pracucci.

This research is funded by the European Union (Project: Mass Customization 2.0 for Integrated PV, GA 101096139). However, the points of view and opinions expressed are those of the Authors only and do not necessarily reflect

those of the European Union. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Notes

- 1) For more information on the MC 2.0 project (Grant Agreement No 10109613), see the webpage: mc2dot0.eu/ [Accessed 5 September 2024].
- 2) For more information on Insulating Photovoltaic Transparent Glass, see the webpage: glasstopower.com/insulating-photovoltaic-transparent-glass/?lang=en [Accessed 5 September 2024].
- 3) The PV-IGU module can achieve light transmission

characteristics of up to 70%, a solar factor of up to 0.42, and electrical energy production of up to 20 Wp/sqm.

References

- Alvarez-Alava, I., Elguezal, P., Jorge, N., Armijos-Moya, T. and Konstantinou, T. (2023), "Definition and design of a prefabricated and modular façade system to incorporate solar harvesting technologies", in *Journal of Facade Design and Engineering*, vol. 11, issue 2, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.47982/jfde.2023.2.T1 [Accessed 6 October 2024].
- Bizzarri, F., Moser, D. and Mazzer, M. (eds) (2020), *A Strategic Plan for Research and Innovation to Relaunch the*

Italian Photovoltaic Sector and Contribute to the Targets of the National Energy and Climate Plan, version 1.0 – 16/07/2020. [Online] Available at: pvimpact.eu/news-resources/reports/download/a-strategic-plan-for-research-and-innovation-to-re [Accessed 15 September 2024].

Bonomo, P. and Eder, G. (eds) (2021), *Categorization of BIPV applications – Breakdown and classification of main individual parts of building skin including BIPV elements – IEA PVPS – Task 15*, Report IEA-PVPS T15-12:2021. [Online] Available at: iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/09/IEA-PVPS-T15-12_2021_BIPV-categorization_report.pdf [Accessed 15 September 2024].

Bonomo, P. and Frontini, F. (2024), “Building Integrated Photovoltaics (BIPV) – Analysis of the Technological Transfer Process and Innovation Dynamics in the Swiss Building Sector”, in *Buildings*, vol. 14, issue 6, article 1510, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14061510 [Accessed 15 September 2024].

Bonomo, P., Frontini, F., Loonen, R. and Reinders, A. H. M. E. (2024), “Comprehensive review and state of play in the use of photovoltaics in buildings”, in *Energy and Buildings*, vol. 323, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114737 [Accessed 16 September 2024].

Chen, T., Tai, K. F., Raharjo, G. P., Heng, C. K. and Leow, S. W. (2023), “A novel design approach to prefabricated BIPV walls for multistorey buildings”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 63, part A, article 105469, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2022.105469 [Accessed 6 October 2024].

Chiaroni, D., Chiesa, V. and Frattini, F. (2019), “A rapidi passi verso la Smart Energy”, in Sassoon, E. (ed.), *La sfida planetaria – Per clima e ambiente è emergenza globale. Che fare? E quanto tempo ci resta?*, Mind Edizioni, Milano, pp. 81-86.

Corti, P., Follo, A. and Bonomo, P. (2024), “Workflow to support cost-benefits comparison and sensitivity analysis of BIPV case studies – Three examples of BIPV facades in the south of Switzerland”, in *Energy & Buildings*, vol. 322, article 114732, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114732 [Accessed 6 October 2024].

Curtius, H. C. (2018), “The adoption of building-integrated photovoltaics – Barriers and facilitators”, in *Renewable Energy*, vol. 126, pp. 783-790. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.001 [Accessed 16 September 2024].

D'Ambrosio, V., Losasso, M., Tersigni, E., Girardi, C. and Gifuni, S. (2021), *Building Integrated Photovoltaics – Repertorio di casi studio e soluzioni tecniche innovative*, Report RdS_PTR_2020_237. [Online] Available at: enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/advance-enea-2019-2021/fotovoltaico-ad-alta-efficienza/report-rds_ptr_2020_237.pdf [Accessed 15 September 2024].

EN 50583-1:2016 (2016), *Photovoltaics in buildings – Part 1 – BIPV modules*. [Online] Available at: standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/a749f8c8-938e-48a4-9a7d-0891a4c57f8f/en-50583-1-2016?srsltid=AfmBOoqH9FxoSl6kCNhpTVCYoX91bWLK8Ns8avwn6uE12VXk42z9eIy9 [Accessed 6 October 2024].

European Commission (2022), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – REPowerEU Plan*, document 52022 DC0230, COM/2022/230 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN [Accessed 6 October 2024].

European Commission (2021), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*, document 52021DC0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550 [Accessed 6 October 2024].

Fagnoni, R. and Olivastri, C. (2019), “Hardesign vs Soft-design”, in *Agathón | International Journal of Architecture Art and Design*, vol. 5, pp. 145-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/5162019 [Accessed 12 October 2024].

Faroldi, E. (2021), “L'architettura delle differenze”, in *Teche | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 21, pp. 9-15. [Online] Available at: doi.org/10.36253/teche-11023 [Accessed 15 September 2024].

Frontini, F., Bonomo, P., Moser, D. and Maturi, L. (2022), “Building integrated photovoltaic facades – Challenges, opportunities and innovations”, in Gasparri, E., Brambilla, A., Lobaccaro, G., Goia, F., Andaloro, A. and Sangiorgio, A. (eds), *Rethinking Building Skins – Transformative Technologies and Research Trajectories*, Woodhead Publishing, Sawston, pp. 201-229. [Online] Available at: doi.org/10.1016/C2019-0-02186-3 [Accessed 15 September 2024].

Giallocosta, G. (2019), “Caratteri e criticità di innovazione di processo | Features and critical issues of process innovations”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 5, pp. 5-10. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/512019 [Accessed 16 September 2024].

IEA – International Energy Agency (2018), *International definitions of BIPV – Photovoltaic Power Systems Programme*, Report IEA-PVPS T15-04:2018. [Online] Available at: iea-pvps.org/key-topics/international-definitions-of-bipv/#:~:text=A%20BIPV%20system%20is%20a,BIPV%20products%20into%20the%20building [Accessed 15 September 2024].

IEC 61730-1:2016 (2016), *Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 1 – Requirements for construction*. [Online] Available at: webstore.iec.ch/en/publication/25674 [Accessed 6 October 2024].

IEC 63092-1:2020 (2020), *Photovoltaics in buildings – Part 1 – Requirements for building-integrated photovoltaic modules*. [Online] Available at: webstore.iec.ch/en/publication/32158 [Accessed 6 October 2024].

Jakica, N. (2018), “State-of-the-art review of solar design tools and methods for assessing daylighting and solar potential for building-integrated photovoltaics”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, part 1, pp. 1296-1328. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.080 [Accessed 15 September 2024].

Knaack, U., Klein, T., Bilow, M. and Auer, T. (2007), *Façades – Principles of Construction*, Birkhäuser, Basel. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-7643-8281-0 [Accessed 15 September 2024].

Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), “Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14112023 [Accessed 15 September 2024].

Meinardi, F., Bruni, F., Castellan, C., Meucci, M., Umair, A. M., La Rosa, M., Catani, J. and Brovelli, S. (2024), “Certification Grade Quantum Dot Luminescent Solar Concentrator Glazing with Optical Wireless Communication Capability for Connected Sustainable Architecture”, in *Advanced Energy Materials*, vol. 14, issue 16, article 2304006, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1002/aenm.202304006 [Accessed 9 October 2024].

Morin, E. (2017), *La sfida della complessità*, Le Lettere, Firenze.

Moser, D. and Maturi, L. (2022), “Nuovi orizzonti della transizione energetica – Sfide e opportunità per l'edilizia | New horizons of the energy transition – Challenges and opportunities for the building sector”, in *Teche | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 24, pp. 40-45. [Online] Available at: doi.org/10.36253/teche-13440 [Accessed 15 September 2024].

Mussinelli, E., Tartaglia, A. and Di Pasquale, J. (2017), “L'innovazione techno-tipologica per l'applicazione di sistemi ibridi alla produzione dell'edilizia abitativa – Tra cultura tecnologica e sperimentazione applicativa | Typological and technological innovation for the application of hybrid systems to housing construction – Between technological culture and application testing”, in *Teche | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 13, pp. 287-294. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Teche-19732 [Accessed 15 September 2024].

Prieto, A., Knaack, U., Auer, T. and Klein, T. (2017), “Solar façades – Main barriers for widespread façade integration of solar technologies”, in *Journal of Façade Design and Engineering*, vol. 5, issue 1, pp. 51-62. [Online] Available at: doi.org/10.7480/jfde.2017.1.1398 [Accessed 16 September 2024].

Rounis, E. D., Athienitis, A. K. and Stathopoulos, T. (2021), “BIPV/T curtain wall systems – Design, development and testing”, in *Journal of Building Engineering*, vol. 42, article 103019, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.job.2021.103019 [Accessed 6 October 2024].

Schiaffonati, F. (2014), “Il contesto culturale e la nascita della disciplina”, in Coordinamento dei Ricercatori di Tecnologia dell'Architettura del Politecnico di Milano (ed.), *La Cultura Tecnologica nella Scuola Milanese*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 17-31.

Sposito, C. and De Giovanni G. (2023), “Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 6 October 2024].

UNI 11277:2008 (2008), *Building sustainability – Eco-compatibility requirements and needs of new and renovated residential and office buildings design*. [Online] Available at: store.uni.com/uni-11277-2008 [Accessed 6 October 2024].

UNI 8289:1981 (1981), *Building – Functional requirements of final users – Classification*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-8289-1981 [Accessed 6 October 2024].

van Noord, M. (ed.) (2023), *Guide for Technological Innovation System Analysis for Building-Integrated Photovoltaics – IEA PVPS – Task 15 – Enabling Framework for the Development of BIPV*, Report IEA-PVPS T15-16:2023. [Online] Available at: iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/08/Report_IEA-PVPS_T15-16-2023-Guide-for-Tech-Innovation-Systems-Analysis-for-Building-Integrated-PV.pdf [Accessed 15 September 2024].

Weerasinghe, R. P. N. P., Yang, R. J., Wakefield, R., Too, E., Le, T., Corkish, R., Chen, S. and Wang, C. (2021), “Economic viability of building integrated photovoltaics – A review of forty-five (45) non-domestic buildings in twelve (12) western countries”, in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, article 110622, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2020.110622 [Accessed 6 October 2024].

Zaffagnini, T. and Morganti, L. (2022), “Data-driven LCA per l'innovazione industriale green delle facciate continue customizzate | Data-driven LCA for green industrial innovation of custom curtain walls”, in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 94-105. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1292022 [Accessed 16 September 2024].