

Politecnico di Torino
Dipartimento di Architettura e Design

Laurea magistrale in
Architettura Costruzione Città

aa. 2020/2021



**Politecnico
di Torino**

Building Integrated Photovoltaics

Progetto di architettura ed innovazione tecnologica
Prassi, sperimentazioni e scenari futuri

relatore
Prof. Guido Callegari

candidata
Eleonora Merolla

correlatore
Prof. Paolo Simeone

/ Abstract (versione italiana)	6
/ Abstract (english version)	8
/ Introduzione (versione italiana)	10
/ Introduction (english version)	16
/ Conclusioni	352
/ Bibliografia	354

/ Indice

1 / Transizione energetica e architettura	24
1.1 Antropocene	29
1.2 Azioni di decarbonizzazione	37
1.3 L'impatto del settore delle costruzioni	43
1.4 Sguardo sull'Europa	51
1.5 Il futuro delle energie rinnovabili	57
1.6 Riflessioni	67
2 / I caratteri del BIPV	72
<i>Definizioni ed unità di misura</i>	76
2.1 Un nuovo componente edilizio	79
2.2 Forme di integrazione e possibili interpretazioni	89
2.3 Cosa hanno da offrire le facciate	99
2.4 Evoluzione del BIPV	103
2.5 Panorama europeo: casi studio selezionati	147
2.6 Approfondimenti	173
2.6.1 Tecnologia fotovoltaica: prima, seconda e terza generazione	173
2.6.2 Stratigrafia dei moduli BIPV	179
2.6.3 Caratteristiche formali	185
3 / Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione	200
3.1 Un ponte tra teoria e pratica	205
con Enrico Ferramondo Marchesi, <i>innovation manager</i> del <i>living lab</i> NEST di Zurigo	
3.2 <i>SolAce</i> : ricerca, produzione e architettura	211
con Pietro Florio, responsabile del progetto di ricerca scientifica dell'Unità di gestione del rischio catastrofi del JRC. Ricercatore presso l'EPFL	
3.3 Questione di approcci	217
con Pierluigi Bonomo, responsabile del BIPV Advanced Building Skin Team della SUPSI	
3.4 Tasselli mancanti per l'Italia	223
con Alessandro Virtuani, ricercatore senior e responsabile del gruppo Moduli e Affidabilità presso l'EPFL e co-fondatore della start-up Officina del Sole (O'Sole)	
4 / Letture trasversali	228
4.1 Geografia del BIPV	235
4.2 Tra forma e per(forma)nce	249
4.3 Strategie di integrazione architettonica	263
4.4 Altre traiettorie di ricerca	293
4.5 Approcci interdisciplinari	333

/ Abstract

La velocità con la quale i cambiamenti climatici stanno trasformando i territori e la qualità delle città ha implicato l'introduzione di modelli di sviluppo più sostenibili, improntati a ridurre gli impatti ambientali attraverso un maggiore utilizzo di risorse rinnovabili.

In un tale scenario di trasformazione, orientato verso una tempestiva transizione energetica, il progetto di architettura gioca il delicato quanto complesso ruolo di favorire, da un lato, la trasformazione delle città verso modelli energetici sostenibili e di contrastare, dall'altro, l'eventuale ricaduta della qualità architettonica e dell'immagine delle città, riconducibile ad un utilizzo indiscriminato di componenti impiantistici sugli edifici, a sua volta ascrivibile a visioni miopi ed unicamente orientate all'efficientamento energetico.

L'importanza riconosciuta nel miglioramento delle prestazioni energetiche dell'ambiente costruito, che negli anni recenti ha visto il diffondersi di programmi di efficientamento energetico orientati verso obiettivi strettamente tecnici, rappresenta oggi, invece, la sfida accolta dal progetto di architettura per instaurare nuovi modelli culturali: è la capacità dei progettisti di interpretare in maniera evoluta il tema dell'integrazione impiantistica, unitamente all'innovazione tecnologica del fotovoltaico apportata da modelli organizzativi di tipo sinergico, a costituire la chiave che sta generando nuovi lessici per il progetto di architettura.

Il seguente lavoro di tesi prenderà in esame tali modelli culturali che, circoscritti a specifici contesti geografici, stanno legando il progetto di architettura all'innovazione tecnologica; l'approccio di ricerca di tipo esplorativo adottato nel presente lavoro esaminerà i principali casi studio localizzati sul territorio europeo, individuando in tal modo i caratteri di innovazione, i prodotti a disposizione ed i processi di sviluppo propri di tali contesti, al fine di identificare quegli approcci di tipo sinergico attraverso i quali il progetto di architettura sta favorendo la trasformazione delle città.

/ Abstract

The speed with which climate change is transforming territories and the quality of cities has led to the introduction of more sustainable development models, aimed at reducing environmental impacts through greater use of renewable resources.

In such a scenario of transformation, oriented towards an early energy transition, architectural design plays the delicate and complex role of encouraging, on the one hand, the transformation of cities towards sustainable energy models and counteracting, on the other hand, any repercussions on the architectural quality and image of cities resulting from the indiscriminate use of plant engineering components on buildings, in turn attributable to short-sighted visions oriented solely towards energy efficiency.

The recognised importance of improving the energy performance of the built environment, which in recent years has seen the spread of energy efficiency programmes oriented towards strictly technical objectives, now represents the challenge taken up by architectural design to establish new cultural models: it is the ability of designers to interpret the theme of plant integration in an improved way, together with the technological innovation of photovoltaics brought by synergistic organisational models, that is the key that is generating new lexicons for architectural design.

The following thesis work will examine these cultural models that, circumscribed to specific geographical contexts, are linking the architectural project to technological innovation; the exploratory research approach adopted in this work will examine the main case studies located on the European territory, identifying the characteristics of innovation, the available products and the development processes of these contexts, in order to identify those synergic approaches through which the architectural project is favouring the transformation of cities.

/ Introduzione

Uno scenario in trasformazione

La sfida energetica accolta dall'Unione Europea per raggiungere entro il 2050 la neutralità climatica della propria economia (Legge sul Clima 2020) imporrà nuovi paradigmi per il sistema energetico e guiderà verso l'elettrificazione e l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, al fine di ridurre drasticamente le emissioni di gas a effetto serra e di allinearsi all'Accordo di Parigi per limitare l'aumento di temperatura media globale ad 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali (ec.europa.COP21).

Per raggiungere gli obiettivi prefissi, tale trasformazione dovrà necessariamente interessare anche tutti i settori a consumo di energia finale in una logica a tuttotondo, tra cui il settore delle costruzioni, quello dei trasporti e quello industriale ne rappresentano i principali consumatori.

Il peso del settore delle costruzioni

Di fronte all'attuale mercato delle costruzioni, lo scenario di decarbonizzazione implicherà un processo di elettrificazione ed efficientamento energetico del settore edilizio, in cui il sistema di produzione e distribuzione energetica tradizionalmente unidirezionale, dalla centrale elettrica all'utenza, potrebbe essere sostituito da una infrastruttura energetica più flessibile e decentralizzata in cui l'utenza, e pertanto l'ambiente costruito, potrebbe contribuire alla stessa produzione energetica con l'introduzione di sistemi impiantistici in loco, le smart grids (IEA Smart Grids 2011). Gli stessi nearly zero energy buildings introdotti con la EPBD del 2010 impongono un maggiore utilizzo di fonti di energia rinnovabile, preferibilmente prodotta in loco, per gli edifici di nuova costruzione, seguendo in questo modo tale direzione. (2010/31/UE)

Un settore relativamente statico che da solo contribuisce all'emissione del 39% di CO₂, come quello delle costruzioni, (IEA Global Status 2019) dovrà quanto prima accogliere la sfida energetica, seguendo tale traiettoria che vede gli edifici inserirsi in un processo innovativo e trasformandosi da consumatori a produttori di energia. Uno studio effettuato da EStà – Economia e Sostenibilità sulla produttività italiana ha individuato una correlazione tra la diminuzione di emissione di CO₂ e l'aumento degli investimenti in ricerca e sviluppo; vale a dire che i settori che meglio rispondono alla sfida verso la transizione energetica, con riduzioni di consumi energetici ed emissioni di GHG, sono gli stessi che generano e supportano la diffusione dell'innovazione tecnologica nelle proprie economie. (EStà, 2020)

La spinta ad accogliere maggiori componenti impiantistici nell'involucro edilizio, al fine di una maggiore elettrificazione ed uso di risorse rinnovabili, modificherà, ed in specifici contesti geografici sta già modificando, l'immagine delle città e la forma della loro architettura.

Tale spinta trasformativa, governata dalla graduale introduzione di innovazione tecnologica nel settore delle costruzioni, sta delineando nuovi modelli culturali in cui è la stessa identità dell'involucro edilizio a mutare: tale modello culturale, che verrà da questo momento in poi definito come BIPV, **Building Integrated Photovoltaics**, rappresenterà l'oggetto di analisi del seguente lavoro di tesi, di cui verranno individuati i caratteri ed i processi di innovazione che stanno costruendo tale relazione tra il progetto di architettura e l'innovazione tecnologica.

All'applicazione di componenti impiantistici in copertura come elementi aggiunti, che verrà definita come BAPV, Building Applied Photovoltaics, si contrappone l'adozione di componenti integrati che associano alla funzione di produzione energetica uno o più requisiti complementari, tali da identificarli come componenti costruttivi secondo la CPR 305/2011 (CPR 305/2011). In accordo con la EN 50583 Photovoltaics in Buildings del 2016, i componenti fotovoltaici integrati sono anche componenti costruttivi ed il loro funzionamento rappresenta un prerequisito per l'integrità funzionale dell'edificio, ovvero l'involucro edilizio di un edificio BIPV non può essere considerato completato in assenza del componente fotovoltaico. (EN 50583)

All'origine di tale differenza tecnica e costruttiva, che ha ottenuto una propria qualifica normativa solo nel 2016, **vi è un più profondo e radicale cambio di visione nell'interpretare il tema dell'integrazione impiantistica nel progetto di architettura e nel ruolo che lo stesso può assolvere in uno scenario di trasformazioni.**

Le direttive energetiche dei primi anni Duemila, l'introduzione delle certificazioni energetiche, i modelli energetici di casa passiva e i programmi di incentivazione per l'adozione di fonti energetiche rinnovabili (periodi dei Feed in Tariff) hanno orientato gli obiettivi verso una visione energetica strettamente tecnicista, in cui la dotazione impiantistica degli edifici per il raggiungimento dei target energetici ha talvolta causato ricadute qualitative per il progetto di architettura, il cui ruolo si è spesso rivelato secondario e funzionale al solo efficientamento energetico.

Parallelamente a quelle che sono le attuali sfide di transizione energetica, invece, oggi si assiste ad un cambio di paradigma in merito all'interpretazione del fotovoltaico sugli edifici ed al suo rapporto con il progetto di architettura e l'innovazione tecnologica. Unitamente agli obiettivi di efficientamento ed elettrificazione del settore delle costruzioni, l'innovazione tecnologica che sta

Nuove prospettive per il progetto di architettura

guidando l'evoluzione del BIPV si orienta verso una traiettoria olistica in cui il progetto di architettura, gli sviluppi tecnologici apportati dalla ricerca e la collaborazione con le industrie mirano ad obiettivi comuni.

Tale cambio di valenza del componente impiantistico, che potrà così rappresentare un valore aggiunto per il progetto di architettura, rappresenta un tema ancora in corso di sviluppo e circoscritto ad ambiti specifici, seppure abbia origine nei primi anni Settanta. L'analisi della sua evoluzione storica porterà ad individuare nuovi lessici architettonici che di volta in volta l'innovazione tecnologica del fotovoltaico ha generato, individuando quelli che sono stati gli impulsi e gli stimoli che hanno sollecitato tali innovazioni, le contraddizioni storiche, la varietà di prodotti ad oggi disponibili, le relative modalità di integrazione in risposta ad esigenze differenti, il rapporto con la normativa, gli approcci innovativi, i modelli di innovazione di specifici contesti e le sfide future.

Impulsi e stimoli

Contrariamente a quanto si potrebbe immaginare in un periodo storico indirizzato alla sostenibilità ambientale, come quello dettato dalla prima crisi energetica degli anni Settanta e proseguito fino agli anni Duemila con i target di efficientamento energetico, gli impulsi che hanno generato tale cambio di paradigma dei componenti integrati saranno invece riconosciuti in altri scenari: da un lato, l'ambizione di ricercatori, università ed architetti che hanno dato origine alle prime sperimentazioni sulla tecnologia solare e alle prime architetture pionieristiche; dall'altro, come dimostreranno alcuni progetti realizzati sulle alte vie, la necessità di rispondere ad una condizione di disagio può rappresentare il bacino dell'innovazione, per cui la difficoltà di collegamento ad una rete elettrica ha sollecitato gli architetti a sperimentare nuove forme di integrazione di fonti energetiche rinnovabili. Talvolta, ancora, è stata la capacità di adattamento di alcune aziende di fronte alla competizione con altri colossi del fotovoltaico ad indirizzare verso l'innovazione dei prodotti.

Strategie di integrazione

Rispetto al passato, in cui i programmi di incentivazione per l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili sugli edifici miravano alla massima produzione energetica con un conseguente utilizzo indiscriminato di impianti fotovoltaici, gli attuali obiettivi energetici per il settore delle costruzioni consistono in edifici ad energia "quasi zero" (direttiva 2010/31/CE), nell'autosufficienza energetica e nella configurazione di comunità energetiche in cui gli stessi edifici possono assumere il ruolo di centrali elettriche di piccole dimensioni, smart grid, per una distribuzione energetica distribuita e decentralizzata. Il principale driver del fotovoltaico si discosta così dalla "massima produzione energetica" per identificarsi nell' "autosufficienza energetica" ed è tale divergenza di obiettivi

che porterà ad individuare ulteriori modalità di integrazione rispetto agli orientamenti preferenziali (applicazioni su coperture inclinate a Sud per l'emisfero boreale), ad evidenziare le potenzialità offerte dall'integrazione sull'involucro verticale e ad inquadrare alcuni approcci di integrazione fotovoltaica in facciata, tra cui la tendenza ad integrare il PV come rivestimento opaco di tutto l'involucro e l'approccio all'integrazione dei componenti fotovoltaici in maniera più puntuale.

Tra le cinque categorie di classificazione dei sistemi BIPV fornita dalla EN 50583 Photovoltaics in Buildings del 2016, due categorie di montaggio prevedono l'integrazione sull'involucro verticale; sebbene tale normativa sia recente, e pertanto non sia considerabile uno degli impulsi che ha dato origine a tale innovazione tecnologica, rappresenta il primo ed unico standard europeo a connettere due realtà diverse (il sistema costruttivo di un edificio e quello impiantistico) e l'inserimento di categorie di integrazione verticali verrà considerato come un'ulteriore conferma anche sul piano normativo dell'assimilazione del fotovoltaico all'involucro edilizio verticale.

L'integrazione del fotovoltaico nel progetto di architettura e, pertanto, nella composizione dell'architettura, ha preso piede già dai primi anni Settanta, quando gli sviluppi tecnologici relativi alle prime sperimentazioni suggerivano un linguaggio architettonico che includeva la stessa tecnologia fotovoltaica nella sua forma standardizzata. Tuttavia, la quota di architetture BIPV in confronto al BAPV risulta ancora ridotta, e tale disparità ha indirizzato l'innovazione tecnologica ad attribuire ai componenti integrati i requisiti formali che meglio supportassero il trasferimento tecnologico nel progetto di architettura, come, ad esempio, l'assenza di telai dei moduli e l'attenzione alla loro finitura esterna. Verranno così analizzate le principali caratteristiche dei moduli fotovoltaici integrati disponibili in commercio, le stratigrafie, le eventuali tecniche di colorazione e le attuali tendenze a mimetizzare o esaltare la tecnologia fotovoltaica.

L'analisi dello stato dell'arte del BIPV, con particolare attenzione al settore edilizio residenziale (che rappresenta il 75% di tutto l'ambiente costruito europeo) e all'integrazione fotovoltaica sull'involucro verticale, individuerà specifiche aree geografiche in cui l'integrazione fotovoltaica nel progetto di architettura risulta più radicata, tra cui il territorio svizzero, austriaco e tedesco.

Tale specificità di contesti indurrà la ricerca ad investigare i modelli ed i carat-

Rapporto con la normativa

L'immagine delle architetture

Da prodotti innovativi ad approcci innovativi

teri propri di queste aree, individuando in tale primato l'adozione di modelli di innovazione costruiti su approcci di tipo sinergico e collaborativo. Il cambio di visione, che ha visto il progetto di architettura saper interpretare il tema dell'integrazione fotovoltaica, non riguarda esclusivamente la capacità di visione di insieme degli architetti, ma investe un modello organizzativo più complesso all'interno del quale l'innovazione tecnologica è implicitamente vincolata alla ricerca, all'industria ed al progetto di architettura.

Talvolta la qualità architettonica dei progetti BIPV può essere attribuita alla competenza degli architetti che, in una visione progettuale orientata all'innovazione, integrano i prodotti BIPV disponibili in commercio o, ancora, ne sono gli ideatori, ma tali prodotti BIPV sono il frutto di nuovi approcci alla ricerca orientati alle esigenze del mercato: l'innovazione tecnologica dell'ambiente costruito e la qualità architettonica degli edifici diventano in tal modo l'obiettivo comune, che vede i principali centri di ricerca e di sviluppo collaborare con le industrie per sperimentare nuovi prodotti. Altre volte, quindi, è proprio questa sinergia tra sfere di competenza diverse, e l'innovazione tecnologica che ne discende, a garantire la qualità architettonica di alcuni progetti di architettura; il progetto di architettura diventa in questo senso il mezzo attraverso il quale si manifesta tale innovazione tecnologica e l'architetto, l'unica figura capace di trasformare l'innovazione tecnologica in immagini e sensazioni, assume il ruolo di sperimentatore.

Metodologia di ricerca

Una tematica in corso di sviluppo e di trasformazione, come l'innovazione della componente impiantistica e la sua introduzione nel progetto di architettura, non risulta ancora consolidata nella storia dell'architettura e, pertanto, non dispone di un'ampia bibliografia, fuorché di articoli e pubblicazioni scientifiche. (Freitas, Brito 2019), (Munari, Roecker, 2019), (PVPS 15 2020), (PVPS T15-07 2019), (Sánchez, Izard, 2015), (SUPSI 2020), (Task 41.A.3/2)

In assenza di una vasta bibliografia sulla storia dell'architettura BIPV, il lavoro di tesi adotterà un approccio di tipo esplorativo basato sull'analisi di quanto finora è stato realizzato e, al fine di una corretta lettura critica, alcuni confronti organizzati con figure esperte ed inserite nel panorama europeo di innovazione BIPV verranno adottati come strumento di confronto e quadro di verifica dei temi individuati. Verranno a tal proposito presentati i momenti di confronto con: Enrico Ferramondo Marchesi, innovation manager del laboratorio di ricerca e innovazione NEST di Empa ed Eawag a Zurigo; Pietro Florio, ricercatore presso il Solar Energy and Building Physics Laboratory LESO-PB dell'École polytechnique fédérale de Lausanne; Pierluigi Bonomo, responsabile del BIPV Advanced Building Skin Team della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana; Alessandro Virtuani, ricercatore senior e responsabile del gruppo Moduli e Affidabilità presso l'École polytechnique fédérale de Lausanne e co-fondatore della start-up Officina del Sole (O'Sole)

/ Introduction

A changing scenario

The energy challenge taken up by the European Union to achieve the climate neutrality of its economy by 2050 (Legge sul Clima 2020) will impose new paradigms for the energy system and drive towards electrification and the use of renewable energy sources, in order to drastically reduce greenhouse gas emissions and align with the Paris Agreement to limit the global average temperature increase to 1.5°C over pre-industrial levels (ec.europa.COP21).

In order to achieve the objectives set, this transformation will also have to involve all the final energy-consuming sectors in an all-round logic, of which the construction, transport and industrial sectors are the main consumers.

The impact of the construction sector

Faced with the current construction market, the decarbonisation scenario will imply a process of electrification and energy efficiency in the building sector, in which the traditionally unidirectional energy production and distribution system, from the power plant to the user, could be replaced by a more flexible and decentralised energy infrastructure in which the user, and therefore the built environment, could contribute to energy production itself with the introduction of on-site plant systems, the smart grids. (IEA Smart Grids 2011). The nearly zero energy buildings introduced with the EPBD in 2010 impose an increased use of renewable energy sources, preferably produced on site, for new buildings, thus following this direction. (2010/31/UE)

A relatively static sector that alone contributes 39% of CO₂ emissions, such as the construction industry, (IEA Global Status 2019) will need to embrace the energy challenge as soon as possible, following this trajectory where buildings become part of an innovative process and transform from consumers to producers of energy. A study carried out by ESTà – Economia e Sostenibilità sulla produttività italiana found a correlation between the decrease in CO₂ emissions and the increase in investment in research and development; i.e. the sectors that best meet the challenge of energy transition, with reductions in energy consumption and GHG emissions, are those that generate and support the diffusion of technological innovation in their economies. (ESTà, 2020)

en

The drive to accommodate more plant components in the building envelope for greater electrification and use of renewable resources will change, and in

specific geographical contexts is already changing, the image of cities and the shape of their architecture.

This transformational drive, governed by the gradual introduction of technological innovation in the construction sector, is shaping new cultural models in which the very identity of the building envelope is changing: This cultural model, which will henceforth be defined as BIPV, **Building Integrated Photovoltaics**, will be the object of analysis in the following thesis, in which the characteristics and processes of innovation that are building this relationship between architectural design and technological innovation will be identified.

The application of plant engineering components on roofs as added elements, which will be defined as BAPV, Building Applied Photovoltaics, is contrasted by the adoption of integrated components that combine the function of energy production with one or more complementary requirements, such as to identify them as building components according to CPR 305/2011 (CPR 305/2011). According to EN 50583 Photovoltaics in Buildings of 2016, integrated photovoltaic components are also building components and their functioning is a prerequisite for the functional integrity of the building, i.e. the building envelope of a BIPV building cannot be considered complete without the photovoltaic component. (EN 50583)

At the origin of this technical and constructional difference, which only obtained its own regulatory qualification in 2016, **there is a deeper and more radical change of vision in interpreting the theme of plant integration in architectural design and the role it can play in a scenario of transformation.**

The energy directives of the early 2000s, the introduction of energy certifications, passive house energy models and incentive programmes for the adoption of renewable energy sources (Feed in Tariff periods) have oriented objectives towards a strictly technical energy vision, in which the equipment of buildings to reach energy targets has sometimes caused qualitative repercussions for architectural design, whose role has often proved secondary and functional only to energy efficiency.

Parallel to the current challenges of energy transition, there is a paradigm shift in the interpretation of photovoltaics on buildings and its relationship with architectural design and technological innovation. Together with the goals of efficiency and electrification of the construction sector, the technological innovation that is driving the evolution of BIPV is oriented towards a holistic trajectory in which architectural design, technological developments brought about by research and collaboration with industry aim at common goals.

This change in the value of the plant engineering component, which can

New perspectives for architectural design

thus represent an added value for the architectural project, is a theme that is still being developed and restricted to specific areas, although it originated in the early 1970s. The analysis of its historical evolution will lead to the identification of new architectural lexicons that photovoltaic technological innovation has generated from time to time, identifying the impulses and stimuli that have prompted such innovations, the historical contradictions, the variety of products available today, their integration in response to different needs, the relationship with regulations, innovative approaches, innovation models for specific contexts and future challenges.

Impulses and triggers

Contrary to what one might imagine in a historical period geared towards environmental sustainability, such as that dictated by the first energy crisis in the 1970s and continued until the 2000s with the energy efficiency targets, the impulses that generated this paradigm shift in integrated components will instead be recognised in other scenarios: on the one hand, the ambition of researchers, universities and architects that gave rise to the first experiments in solar technology and the first pioneering architectures; on the other hand, as some of the projects carried out on the high streets will show, the need to respond to a condition of discomfort can represent the reservoir of innovation, so that the difficulty of connecting to an electricity grid has prompted architects to experiment with new forms of integrating renewable energy sources. Sometimes it is the adaptability of some companies in the face of competition from other photovoltaic giants that has led to product innovation.

Strategies of integration

Compared to the past, when incentive programmes for the use of renewable energy sources in buildings aimed at maximum energy production with a consequent indiscriminate use of photovoltaic installations, the current energy objectives for the construction sector consist of “nearly zero” energy buildings (Directive 2010/31/EC), energy self-sufficiency and the configuration of energy communities in which the buildings themselves can take on the role of small-scale power plants, smart grids, for distributed and decentralised energy distribution. The main driver for photovoltaics is thus moving away from “maximum energy production” towards “energy self-sufficiency” and it is this divergence of objectives that will lead to the identification of further integration methods with respect to preferred orientations (applications on south-facing roofs for the northern hemisphere), to highlight the potential of integration on the vertical envelope and to frame some approaches to photovoltaic integration on the façade, including the trend towards integration of PV as an opaque covering of the whole envelope and the approach to integration of photovoltaic components in a more punctual manner.

Among the five categories of classification of BIPV systems provided by EN 50583 Photovoltaics in Buildings of 2016, two categories of installation involve integration on the vertical envelope; although this legislation is recent, and therefore cannot be considered as one of the impulses that gave rise to this technological innovation, it represents the first and only European standard to connect two different realities (the construction system of a building and the plant engineering system) and the inclusion of vertical integration categories will be considered as a further confirmation of the assimilation of photovoltaics to the vertical building envelope.

Relationship with regulations

The integration of photovoltaics into architectural design and thus into the composition of architecture has taken hold since the early 1970s, when technological developments related to early experiments suggested an architectural language that included photovoltaic technology itself in its standardised form. However, the share of BIPV architectures compared to BAPV is still small, and this disparity has directed technological innovation to give integrated components the formal requirements that best support technology transfer in architectural design, such as, for example, the absence of module frames and attention to their external finish. The main characteristics of commercially available integrated photovoltaic modules, stratigraphy, possible colouring techniques and current trends in camouflaging or enhancing photovoltaic technology will be analysed.

The image of architecture

The analysis of the state of the art of BIPV, with particular attention to the residential building sector (which represents 75% of the entire European built environment) and to photovoltaic integration on the vertical envelope, will identify specific geographical areas where photovoltaic integration in architectural design is more established, including Switzerland, Austria and Germany.

From innovative products to innovative approaches

This specificity of contexts will lead research to investigate the models and characteristics of these areas, identifying in this primacy the adoption of innovation models built on synergic and collaborative approaches. The change in vision, in which the architectural project has been able to interpret the theme of photovoltaic integration, does not only concern the architects' ability to see as a whole, but involves a more complex organisational model within which technological innovation is implicitly linked to research, industry and architectural design.

Sometimes the architectural quality of BIPV projects can be attributed to the expertise of architects who, in an innovation-oriented design vision, integrate commercially available BIPV products or are the creators of them, but these BIPV products are the result of new research approaches geared to the ne-

eds of the market: technological innovation in the built environment and the architectural quality of buildings thus become the common goal, with leading research and development centres collaborating with industry to test new products. At other times, therefore, it is precisely this synergy between different spheres of expertise, and the resulting technological innovation, that guarantees the architectural quality of certain architectural projects; In this sense, the architectural project becomes the medium through which this technological innovation is manifested and the architect, the only figure capable of transforming technological innovation into images and sensations, takes on the role of experimenter.

Research methodology

A developing and transforming theme, such as the innovation of the plant component and its introduction into architectural design, is not yet consolidated in the history of architecture and therefore does not have an extensive bibliography, apart from articles and scientific publications. (Freitas, Brito 2019), (Munari, Roecker, 2019), (PVPS 15 2020), (PVPS T15-07 2019), (Sánchez, Izard, 2015), (SUPSI 2020), (Task 41.A.3/2)

In the absence of an extensive bibliography on the history of BIPV architecture, the thesis will adopt an exploratory approach based on the analysis of what has been achieved so far and, for the purpose of a correct critical reading, some comparisons organised with expert figures in the European panorama of BIPV innovation will be adopted as a means of comparison and a framework for verifying the themes identified. In this regard, discussions will be presented with: Enrico Ferramondo Marchesi, innovation manager at Empa and Eawag's NEST research and innovation laboratory in Zurich; Pietro Florio, researcher at the Solar Energy and Building Physics Laboratory LESO-PB of the École polytechnique fédérale de Lausanne; Pierluigi Bonomo, head of the BIPV Advanced Building Skin Team at the University of Applied Sciences of Southern Switzerland; Alessandro Virtuani, senior researcher and head of the Modules and Reliability group at the École polytechnique fédérale de Lausanne and co-founder of the start-up Officina del Sole (O'Sole)

L'attualità del tema affrontato ha reso il confronto con gli esperti del settore BIPV un interessante strumento di ricerca, adottato per validare le ipotesi emerse in questo lavoro.

*Pertanto, in ordine prettamente alfabetico, ci tengo a ringraziare **Pierluigi Bonomo**, responsabile del BIPV Advanced Building Skin Team della SUPSI (Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana) e membro del programma PVPS dell'International Energy Agency, **Pietro Florio**, responsabile del progetto di ricerca scientifica dell'Unità di gestione del rischio catastrofi del JRC e, alla data dell'intervista, ricercatore del gruppo LESO-PB (Solar Energy and Building Physics Laboratory) della Scuola Politecnica Federale di Losanna, **Enrico Ferramondo Marchesi**, tra i dirigenti del laboratorio NEST (Next Evolution in Sustainable Building Technologies) degli istituti Empa e Eawag ed **Alessandro Virtuani**, ricercatore senior e responsabile del gruppo Moduli e Affidabilità presso la Scuola Politecnica Federale di Losanna e co-fondatore della start-up Officina del Sole (O'Sole) per il tempo che mi hanno dedicato.*

- 1.1 Antropocene
- 1.2 Azioni di decarbonizzazione
- 1.3 L'impatto del settore delle costruzioni
- 1.4 Sguardo sull'Europa
- 1.5 Il futuro delle energie rinnovabili
- 1.6 Riflessioni

1 / Transizione energetica e architettura

Con uno sguardo agli ultimi decenni, è possibile riconoscere nel XXI secolo scenari di importanti trasformazioni causate dall'uomo che ne hanno inevitabilmente modificato l'esistenza, come il fenomeno della globalizzazione ed i processi di digitalizzazione.

*In questa sede, però, tra i grandi cambiamenti in atto è doveroso soffermarsi a riflettere su un altro importante driver che sta guidando questa trasformazione, la **lotta al cambiamento climatico**. La temperatura media globale è in continuo aumento a causa delle emissioni di gas a effetto serra prodotte dall'azione antropica e le ripercussioni di questo fenomeno, sempre più evidenti e numerose, provocheranno danni che di questo passo saranno irreversibili. (IPCC 2018)*

Oggi la maggiore sfida accolta a livello mondiale è la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra prodotte dallo sfruttamento di combustibili fossili, a tal punto da parlare di transizione energetica come una fase di passaggio verso l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

*Considerando che lo scenario appena menzionato è in parte dovuto ad un patrimonio edilizio poco sostenibile che da solo emette il 39% di CO₂, la trasformazione del settore delle costruzioni in termini di efficientamento energetico è oggi tra i principali target della trasformazione. Da qui, quindi, la necessità di fermarsi a riflettere sulle **ricadute della transizione energetica sul progetto di architettura** e sul ruolo di quest'ultimo che deve saper rispondere a questi nuovi requisiti, trasformando i limiti imposti in opportunità progettuali.*



“
Il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile e, a partire dagli anni ‘50, molti dei cambiamenti osservati sono senza precedenti su scale temporali che variano da decenni a millenni; [...] La temperatura atmosferica superficiale mostra che ciascuno degli ultimi tre decenni sulla superficie della Terra è stato in sequenza più caldo di qualsiasi decennio precedente dal 1850. ”

(IPCC 2014)

(a sinistra)
North Pole Underwater
fotografia di Sue Flood
per l'International Photo
Awards, categoria One-Shot:
Climate Change nella sezione
acqua

1.1 ANTROPOCENE

Temperatura

L'*Intergovernmental Panel of Climate*¹ (IPCC) definisce il cambiamento climatico come “una variazione statisticamente significativa nello stato medio del clima o nella sua variabilità, che persiste per un periodo prolungato” (IPCC 2001) e dichiara come i cambiamenti climatici abbiano causato impatti negativi per l'ambiente e la popolazione mondiale. Secondo le ricerche condotte dall'IPCC, i fenomeni naturali estremi che stanno colpendo l'ecosistema naturale non sono altro che la conseguenza della costante crescita della temperatura media globale causata dall'uomo. (IPCC 2014)

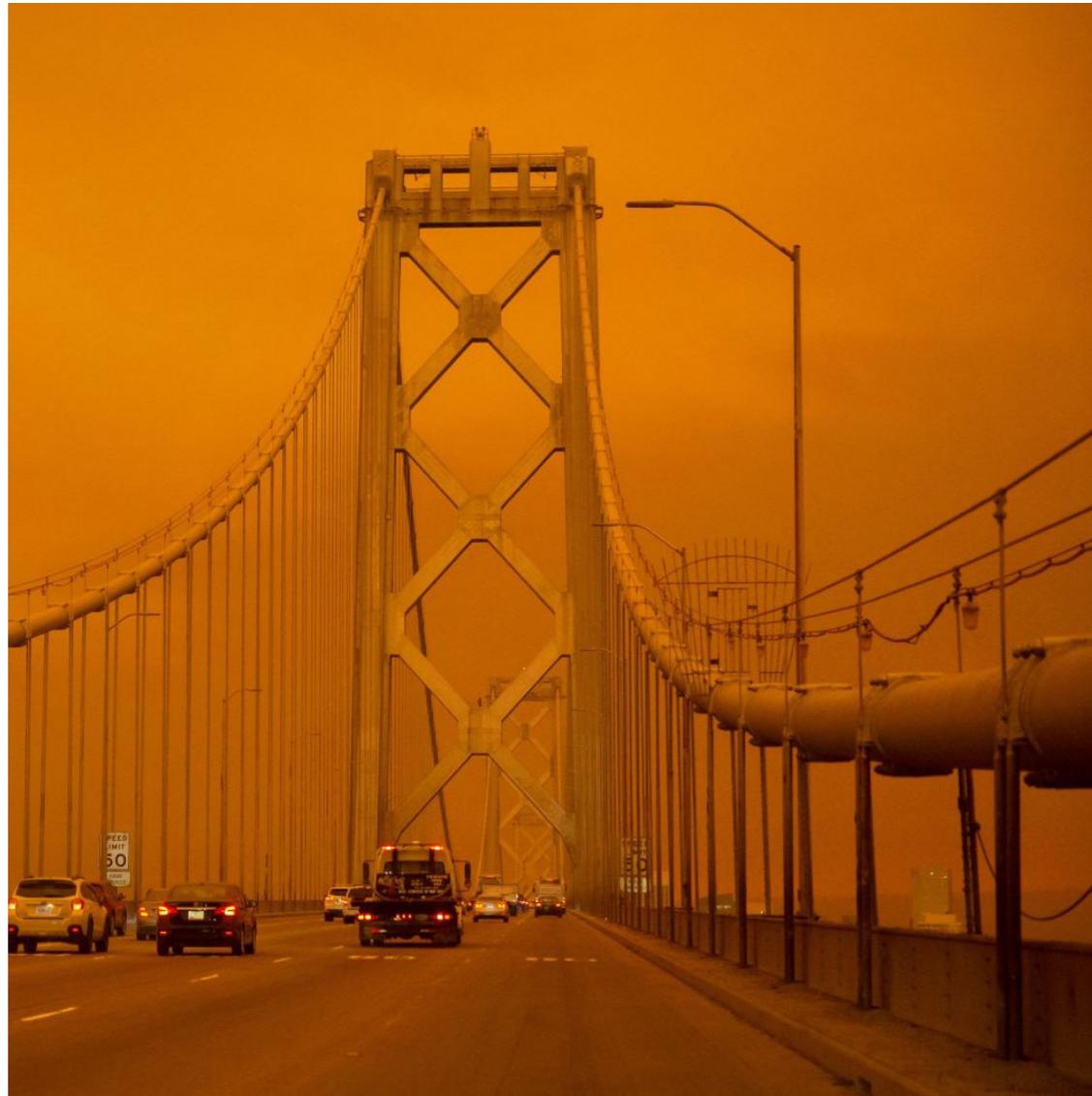
La considerazione che l'uomo sia diventato un soggetto capace di modificare l'evoluzione del pianeta è altamente condivisa, a tal punto da indurre gli studiosi ad introdurre una nuova epoca geologica condizionata dal comportamento dell'uomo che viene quindi inteso come un nuovo agente geologico: l'Antropocene, termine coniato nel 2000 dal chimico olandese premio Nobel Paul Crutzen, rappresenta la nuova era geologica caratterizzata dall'impronta dell'uomo sull'ecosistema globale.

L'emergente crisi ambientale ha indotto le parti della “Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici” (UNFCCC) durante la XXI conferenza nel 2015 (COP21) a esortare l'IPCC a redigere un report speciale su quelli che sarebbero gli impatti ambientali se la temperatura media globale raggiungesse 1,5 °C sopra i livelli pre-industriali. Durante quella stessa conferenza è stato firmato l'Accordo di Parigi, il primo accordo universale e giuridicamente vincolante sui cambiamenti climatici che imponeva di limitare l'aumento della temperatura a 1,5°C, valore limite per ridurre in maniera significativa rischi altrimenti irreversibili. (ec.europa.COP21) Nello “Special Report on Global Warming of 1,5°C” redatto per l'occasione, l'IPCC stima che l'azione antropica abbia già causato circa 1,0°C di riscal-

1. Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) è l'organismo delle Nazioni Unite per la valutazione della scienza relativa al cambiamento climatico

2. Il fenomeno del riscaldamento globale è osservato monitorando la temperatura media globale rispetto a quella registrata ai livelli pre-industriali tra il 1850 e il 1900

(a sinistra)
San Francisco, 2020.
<https://www.latimes.com/>



damento globale registrato nel 2017 e che al ritmo attuale la temperatura possa raggiungere 1,5°C tra il 2030 e il 2052, aumentando i rischi legati al clima per i sistemi naturali e umani. (IPCC 2018) **figura 1**

GHG

L'IPCC riconosce come causa principale del riscaldamento globale le emissioni dei gas a effetto serra (GHG)³ prodotte dall'uomo e ne registra un continuo aumento rispetto all'epoca pre-industriale; le concentrazioni atmosferiche di diossido di carbonio (anidride carbonica) (CO₂), metano (CH₄) e ossido di diazoto (N₂O) raggiungono oggi i valori più alti mai registrati negli ultimi 800.000 anni e circa la metà delle emissioni cumulate tra il 1750 ed il 2011 è stata prodotta solo negli ultimi quarant'anni (IPCC 2014). Dai monitoraggi riportati dall'IPCC, la CO₂ prodotta da processi industriali e dall'uso di combustibili fossili è il gas a effetto serra che si rileva in maggiore quantità, per cui quello più rilevante. Secondo i grafici dell'*International Energy Agency IEA*⁴, l'andamento delle emissioni globali di CO₂ ha visto un progressivo aumento dai livelli pre-industriali raggiungendo nel 2019 una produzione annua di 33 Gt CO₂; a causa della pandemia di COVID19, il 2020 ha registrato una riduzione di domanda energetica di circa il 5% con un conseguente calo di emissioni dell'8% corrispondente a quasi 2,6 Gt CO₂, una riduzione che ha riportato la curva ai valori di dieci anni fa. Tale riduzione, tuttavia, non esclude un possibile rimbalzo delle emissioni che potrebbe anche essere maggiore del calo. (IEA Review 2020) **figura 2**

La considerazione totalmente condivisa che le eccessive percentuali di CO₂ presenti in atmosfera rappresentino la principale causa del riscaldamento globale e dei corrispondenti fenomeni di cambiamento climatico ha indotto le autorità ad adottare azioni immediate, individuando nel monitoraggio e nella limitazione delle emissioni GHG il principale obiettivo delle attuali politiche internazionali per il clima.

I dati forniti dall'International Energy Agency IEA evidenziano come il settore che causa maggiori emissioni di CO₂ dovute ad un significativo utilizzo dei combustibili fossili sia quello legato alla produzione di elettricità e calore, ovvero il settore che trasforma l'energia primaria ricavata da risorse energetiche fossili e combustibili nucleari in

3. gas a effetto serra (Green House Gases GHG o gas climalteranti) sono l'anidride carbonica (CO₂), il metano (CH₄), l'ossido di diazoto (N₂O), gli idrofluorocarburi (HFC), i perfluorocarburi (PFC), l'esfluoruro di zolfo (SF₆). La riduzione dei GHG ha rappresentato l'obiettivo del Protocollo di Kyoto sottoscritto nel 1997

4. L'International Energy Agency IEA è stata creata a seguito della crisi petrolifera del 1973, come accordo internazionale per garantire la sicurezza degli approvvigionamenti petroliferi

figura 1
Variazione della temperatura superficiale globale
(fonte: NASA GISS; rielaborazione grafica)
<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

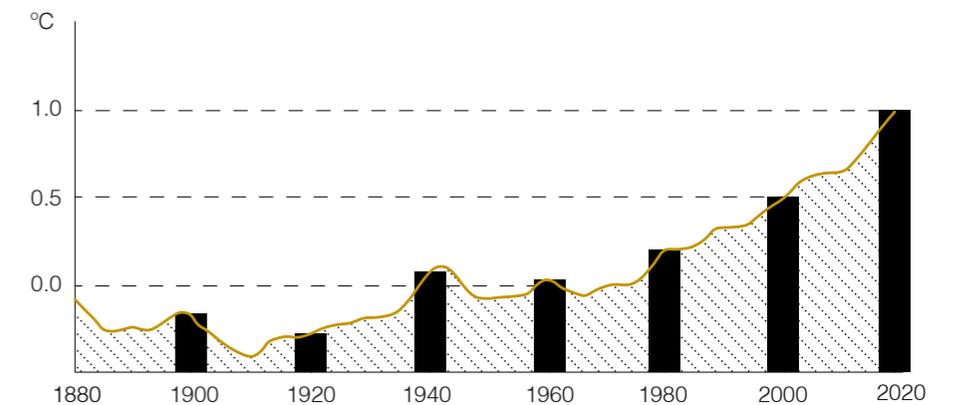
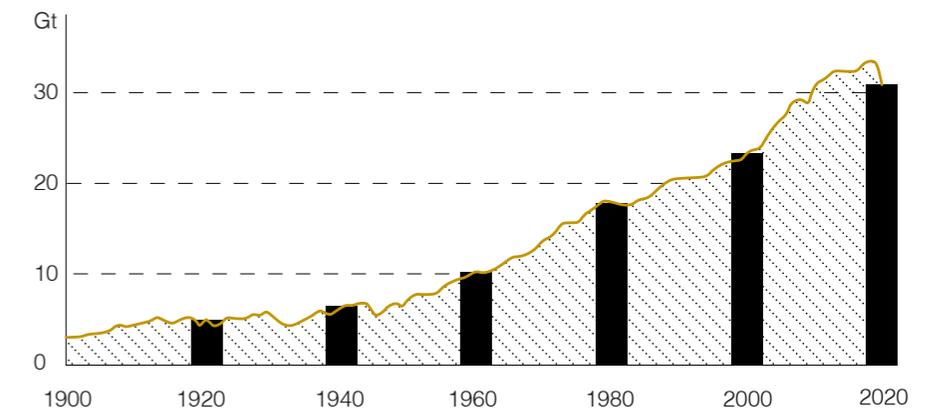


figura 2
Produzione di CO₂ a livello globale
(fonte: IEA data&statistics; rielaborazione grafica)
www.iea.org



energia finale. Tuttavia, in virtù del fatto che per tutti gli altri settori l'approvvigionamento energetico sia un fattore vitale, è assolutamente necessario monitorare e ridurre le emissioni dei GHG prodotte soprattutto da questi settori a consumo di energia finale, tra cui quello delle costruzioni, quello industriale e quello dei trasporti che registrano la più alta domanda energetica. **figura 3**

Secondo gli scienziati dell'IPCC, è quindi necessario un piano d'azione esteso a diverse scale, da quelle internazionali a quelle regionali, volta ad adottare strategie di mitigazione dell'uso di combustibili fossili promuovendo, al contrario, l'uso di energie rinnovabili in tutti i settori ed aumentare l'efficienza energetica al fine di ridurre il consumo energetico finale. (IPCC 2018)

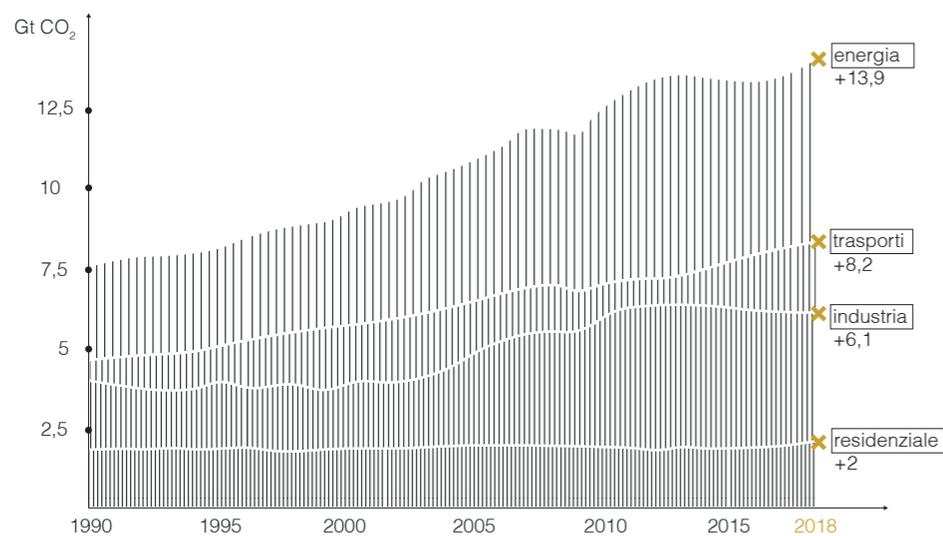


figura 3
Produzione di CO₂ a livello globale per settori
 (fonte: IEA data&statistics; rielaborazione grafica)
www.iea.org

(a destra)
Above the clouds
 fotografia di Barbara Zanon per l'International Photo Awards, categoria One-Shot: Climate Change nella sezione aria

(a seguire)
#CleanAirNow
 campagna di sensibilizzazione realizzata da Ogilvy Hong Kong per Greenpeace
<https://www.ogilvy.com/#work>



WE CAN
ONLY CHANGE
2030



IF WE ALL
DEMAND A CHANGE
IN 2020

Pledge your support at [greenpeace.org](https://www.greenpeace.org)
#CleanAirNow

GREENPEACE

WE CAN
ONLY CHANGE
2030



IF WE ALL
DEMAND A CHANGE
IN 2020

Pledge your support at [greenpeace.org](https://www.greenpeace.org)
#CleanAirNow

GREENPEACE

1.2 AZIONI DI DECARBONIZZAZIONE

La sfida verso la decarbonizzazione è oggi una realtà concreta e la transizione verso l'energia pulita è in pieno atto.

Con il discorso sullo stato dell'Unione pronunciato il 16 settembre 2020 alla plenaria del Parlamento Europeo, la Presidente della Commissione Europea Ursula von der Leyen dedica una sezione del dibattito alla transizione energetica da compiere il prima possibile e sottolinea il ruolo che l'Unione Europea ricopre nella lotta al riscaldamento globale. In questa occasione vengono anticipati i contenuti chiave della futura Legge sul Clima proposta dalla Commissione Europea nel marzo 2020. (Legge sul Clima 2020) La proposta di regolamento, che modifica il precedente regolamento europeo UE 2018/1999 (Regolamento UE 2018), appartiene alle iniziative del Green Deal europeo, il piano strategico adottato dall'Europa per rispondere all'urgenza climatica ed il degrado ambientale, con azioni mirate alla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, investimenti nella ricerca e nell'innovazione tecnologica e interventi per preservare l'ambiente naturale dell'Europa.

La Legge sul Clima rappresenta quindi uno strumento per tradurre in legge l'obiettivo del Green Deal di rendere l'economia europea climaticamente neutrale entro il 2050, riducendo a zero le emissioni nette di gas a effetto serra e rispettando così gli obiettivi definiti dall'Accordo di Parigi di non superare il +1,5 °C della temperatura media globale. Per raggiungere tale risultato, la Commissione ha proposto di includere anche un obiettivo intermedio che prevede la riduzione di GHG rispetto ai livelli del 1990 di almeno il 55% entro il 2030. È compito poi di ciascun Paese sviluppare delle strategie nazionali a lungo termine su come intendono raggiungere le riduzioni delle emissioni di gas a effetto serra necessarie per rispettare i loro impegni.

Il Green Deal europeo rappresenta solo l'ultima delle tappe di un processo di transizione che negli ultimi decenni ha visto l'Europa

impegnata in azioni mirate a migliorare l'efficienza energetica e a promuovere l'utilizzo di risorse rinnovabili. Comparata con altre economie mondiali, quella europea ha infatti registrato importanti risultati in termini di riduzione di emissioni di CO₂, dalle 4 Gt prodotte nel 1990 alle 3,1 Gt del 2018. (IEA data) **figura 1**

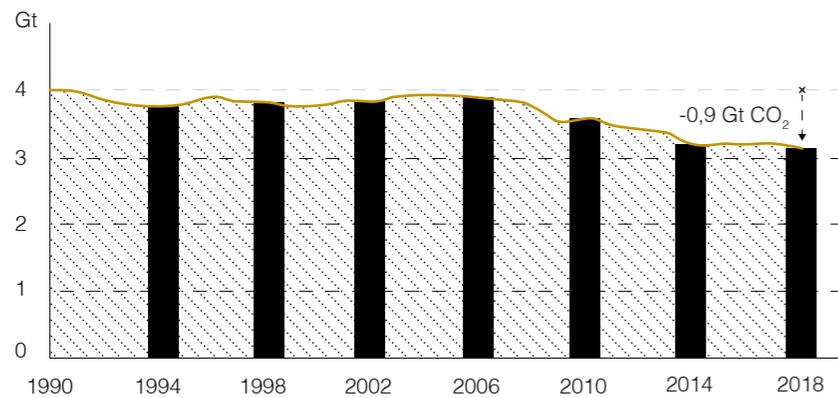


figura 1
Produzione di CO₂ a livello europeo
(fonte: IEA data&statistics;
rielaborazione grafica)
www.iea.org

“ **There is no more urgent need for acceleration than when it comes to the future of our fragile planet. [...] We know change is needed – and we also know it is possible. The European Green Deal is our blueprint to make that transformation. The second example are the buildings we live and work in. [...] Our buildings generate 40% of our emissions. They need to become less wasteful, less expensive and more sustainable. And we know that the construction sector can even be turned from a carbon source into a carbon sink, if organic building materials like wood and smart technologies like AI are applied. ”**

Ursula von der Leyen
discorso sullo stato dell'Unione alla plenaria del
Parlamento Europeo in data 16.09.2020

Ripercorrendo gli obiettivi climatici che nel corso dell'ultimo decennio l'Unione Europea ha fissato per rispondere all'urgenza del riscaldamento globale si evidenziano:

1 / **Pacchetto per il clima e l'energia 2020**, entrato in vigore nel 2009 con la direttiva europea 2009/29/CE

A seguito degli obiettivi internazionali fissati nel 1997 con il Protocollo di Kyoto per ridurre entro il 2012 una quantità di GHG fissata per ciascun Paese sottoscritto, l'UE ha proposto il piano europeo 20-20-20 per raggiungere i seguenti obiettivi entro il 2020 (Pacchetto 2020):

- 20% di riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra rispetto alle emissioni del 1990
- 20% dell'energia dell'UE prodotta da fonti rinnovabili
- 20% di miglioramento dell'efficienza energetica

Anche in questo caso i Paesi membri dell'EU dovevano definire obiettivi nazionali vincolanti diversi per ciascun Paese, come per esempio la quota di energia rinnovabile del 10% a Malta e del 49% in Svezia. Rispetto al 20% europeo, il target italiano per l'energia prodotta da FER¹ era del 17%, (2020targets) ma i valori indicativi del 2018/2019 arrivano al 12,9%. (EU.energy) Tuttavia, uno sguardo all'andamento complessivo delle emissioni presente nel grafico precedente mostra come l'obiettivo fissato sia stato raggiunto con una riduzione delle emissioni di CO₂ del 25% rispetto al 1990.

2 / **Pacchetto energia pulita per tutti gli europei**, aggiornato nel 2019 al fine di rispettare l'Accordo di Parigi con obiettivi vincolanti entro il 2030 (Pacchetto.energia.pulita):

- 40% di riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra rispetto alle emissioni del 1990
- 32% dell'energia dell'UE prodotta da fonti rinnovabili con la direttiva 2018/2001/UE in vigore dal 2018
- 32,5% di miglioramento dell'efficienza energetica con la direttiva (UE)2018/2002 in vigore dal 2018

1. Fonti Energetiche Rinnovabili (FER)

Gli stati membri erano tenuti a presentare entro la fine del 2019 i rispettivi piani nazionali per l'energia e il clima (NECP) relativi al periodo 2021-2030, introdotti dal Regolamento sulla governance dell'unione dell'energia e dell'azione per il clima (UE) 2018/1999 in vigore dal 2018. (Regolamento UE 2018)

L'obiettivo di riduzione delle emissioni di GHG del 40% rispetto ai livelli del 1990 è attualmente oggetto di discussione con la possibilità che sia aumentato al 50-55% per raggiungere l'obiettivo di neutralità climatica. (Legge sul Clima 2020)

3 / **neutralità climatica entro 2050**, con un'economia ad emissioni nette di gas GHG pari a zero.

Questo obiettivo è al centro del Green Deal Europeo, il piano strategico europeo con cui si è aperto questo paragrafo e la Legge sul clima proposta dalla Commissione Europea (Legge sul Clima 2020)

1.3 L'IMPATTO DEL SETTORE DELLE COSTRUZIONI

In una panoramica globale, l'ambiente costruito rientra tra i principali target per le azioni di riduzione dei GHG a causa delle elevate emissioni di CO₂ associate ai processi di costruzione ed alla produzione di energia usata negli edifici. Nel 2018 gli edifici hanno rappresentato complessivamente il settore più rilevante per consumo di energia finale ed emissioni di CO₂, registrando rispettivamente il 36% ed il 39%. (IEA Global Status 2019) **figura 1**

L'impatto che gli edifici hanno sul riscaldamento globale li rende oggetto di costante valutazione. Per valutare le prestazioni ambientali di un edificio, lo standard europeo EN 15978 introdotto nel 2011 specifica un metodo di calcolo basato sulla valutazione dell'intero ciclo di vita di un edificio definendo tutte le sue fasi, dalla costruzione al termine della sua vita. Sulla base di tale norma, è possibile associare a ciascuno stadio di vita dell'edificio le rispettive emissioni di CO₂ prodotte, distinguendo quelle emesse dai processi di costruzione da quelle legate all'approvvigionamento energetico degli edifici. **figura 2**

Seguendo le definizioni presenti in "Bringing embodied carbon upfront" del World Green Building Council¹:

Le emissioni di carbonio incorporato **embodied carbon** si riferiscono a quelle prodotte durante tutto il ciclo di vita di un edificio, dai processi di produzione dei materiali e quelli di costruzione, comprendendo le fasi di estrazione dei materiali, trasporto e lavorazione, fino al termine della vita utile dell'edificio. (World GBC 2019)

Le emissioni di carbonio operativo **operational carbon** sono quelle legate alla produzione dell'energia necessaria per il funzionamento dell'edificio e comprendono il riscaldamento, il raffrescamento, l'acqua calda sanitaria, l'illuminazione e le altre apparecchiature elettriche. (World GBC 2019) (IEA Global Status 2019)

1. Il World Green Building Council (WorldGBC) è una organizzazione internazionale che riunisce i Green Building Council (GBC), associazioni nazionali indipendenti che operano nel settore dell'edilizia sostenibile

/ final energy

/ CO₂ emissions

figura 1
Quota globale di energia finale ed emissioni di CO₂ per settori, con approfondimento sul settore delle costruzioni
 Quota di energia finale per settori nella colonna di sinistra. Quota di emissioni di CO₂ per settori nella colonna di destra.
 Le emissioni indirette sono quelle derivanti dalla produzione di elettricità e calore
 (fonte: IEA Global Status 2019; rielaborazione grafica)

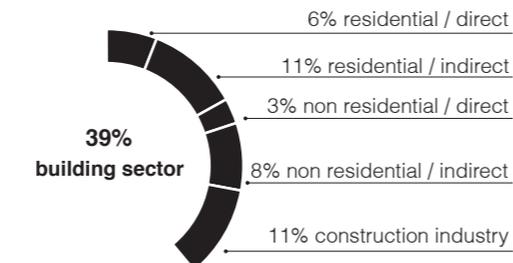
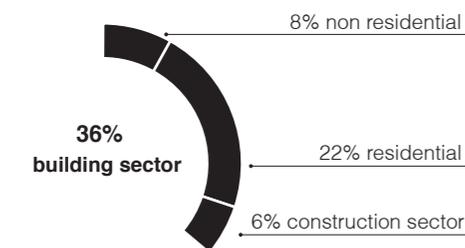
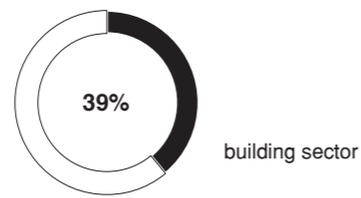
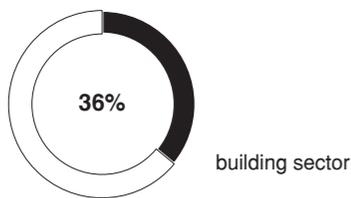
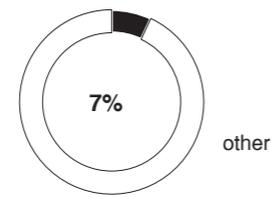
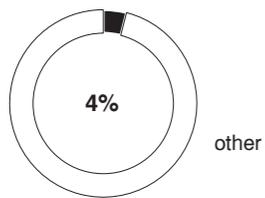
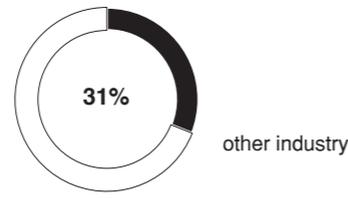
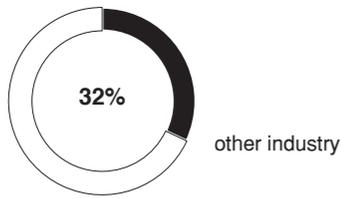
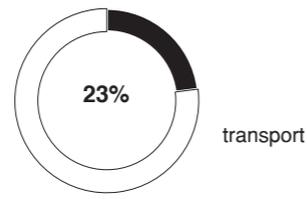
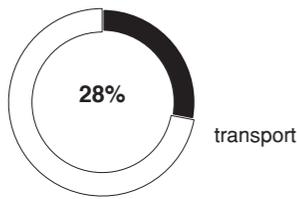


figura 2
Emissioni di CO₂ di un edificio distinte per ciascuna fase del ciclo di vita di un edificio.
 La terminologia utilizzata fa riferimento ai termini e alle fasi del ciclo di vita definiti nella norma EN 15978
 (fonte: World GBC 2019; rielaborazione grafica)

upfront carbon *The emissions caused in the materials production and construction phases (A1-5) of the lifecycle before the building or infrastructure begins to be used.*

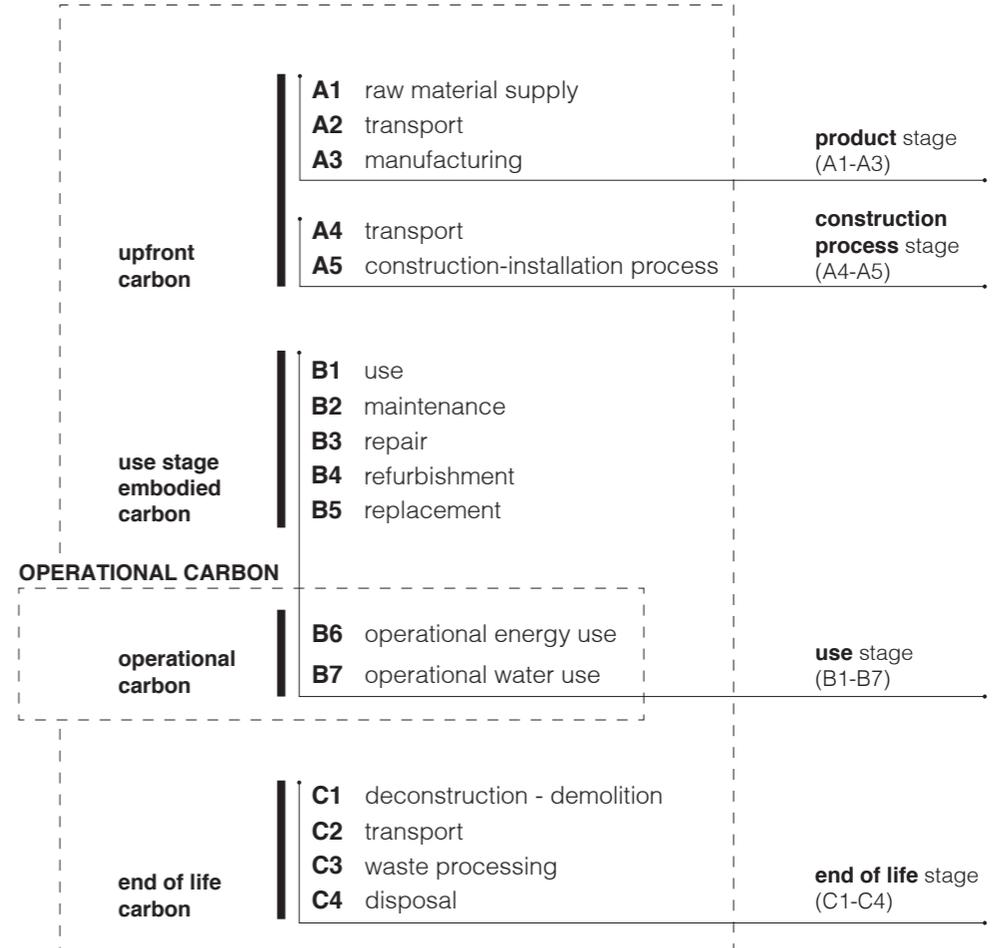
use stage embodied carbon *Emissions associated with materials and processes needed to maintain the building or infrastructure during use such as for refurbishments.*

operational carbon *The emissions associated with energy used to operate the building or in the operation of infrastructure.*

end of life carbon *The carbon emissions associated with deconstruction/demolition (C1), transport from site (C2), waste processing (C3) and disposal (C4) phases of a building or infrastructure's lifecycle which occur after its use. structure.*

beyond the life cycle *Carbon emissions or emissions savings incurred due to reuse or recycling of materials or emissions avoided due to using waste as a fuel source for another process*
 (fonte: World GBC 2019)

EMBODIED CARBON



WHOLE LIFE CARBON



SUPPLEMENTARY INFORMATION BEYOND THE BUILDING LIFE CYCLE

Come già anticipato, trasformare l'energia primaria in energia finale sfruttando fonti energetiche non rinnovabili è la principale causa del riscaldamento globale e rappresenta oggi una pratica ancora troppo diffusa rispetto all'uso delle risorse rinnovabili. L'utilizzo di fonti non rinnovabili per l'approvvigionamento energetico degli edifici, infatti, ha prodotto quantità di CO₂ (*operational carbon*) che ammontano al 28% delle missioni globali e che, unite all'11% di emissioni di carbonio incorporato (*embodied carbon*), hanno portato gli edifici a raggiungere valori intollerabili, quali il 39% riportato in precedenza. È evidente, quindi, come la produzione di CO₂ dipenda fortemente dal consumo energetico finale di un edificio, che a sua volta è governato da una elaborata combinazione di variabili socio-economiche, storiche e tecnologiche che viene descritta dal modello ETP² in "ETP2020 Energy Technology Perspectives 2020" della IEA. (ETP 2020) **figura 3**

Complessivamente, è possibile affermare che ridurre le emissioni operative di CO₂ nel settore edilizio equivale da un lato a ridurre la domanda energetica, dall'altro a migliorare l'efficienza energetica degli edifici con un uso maggiore di risorse rinnovabili.

Gli ultimi anni hanno registrato un aumento delle emissioni di CO₂ legate all'energia degli edifici, arrivando nel 2019 a 10 GtCO₂, il valore più alto mai osservato. Sebbene un appiattimento delle emissioni tra il 2013 e il 2016 dovuto ad un minore consumo energetico potesse apparire come un segnale di progresso, l'aumento della domanda energetica ripresa dal 2016 fino ad oggi ha controbilanciato i risultati raggiunti ed ha determinato un rilancio delle emissioni operative di CO₂. (IEA Tracking Buildings 2020)

Le cause di questo aumento vanno ricercate tra gli indicatori della domanda energetica e si possono attribuire principalmente all'incremento di temperatura e popolazione registrato negli ultimi decenni. Nonostante l'intensità energetica degli edifici (intesa come l'uso finale di energia per m²) sia in continua decrescita con riduzioni nella domanda di riscaldamento e acqua calda sanitaria, il progressivo aumento delle temperature ha causato un'importante crescita della domanda di raffrescamento. (IEA Global Status 2019) **figura 4**

2. L'analisi proposta in *Energy Technology Perspectives 2020* mira a valutare le possibili evoluzioni al lungo termine del settore energetico, applicando una combinazione di tecniche di scenario nell'arco temporale che dal 2020 arriva al 2070 (tra cui gli scenari normativi, che delineano percorsi plausibili verso uno stato finale desiderato, e gli scenari esplorativi, che esaminano ciò che è probabile che accada sulla base di ipotesi). Lo strumento principale adottato in ETP2020 è il modello ETP, attraverso cui vengono manipolati i dati del settore relativo all'approvvigionamento energetico e dei settori ad uso finale con la più alta domanda energetica (industria, trasporti ed edifici) e ne vengono esplorati i risultati.

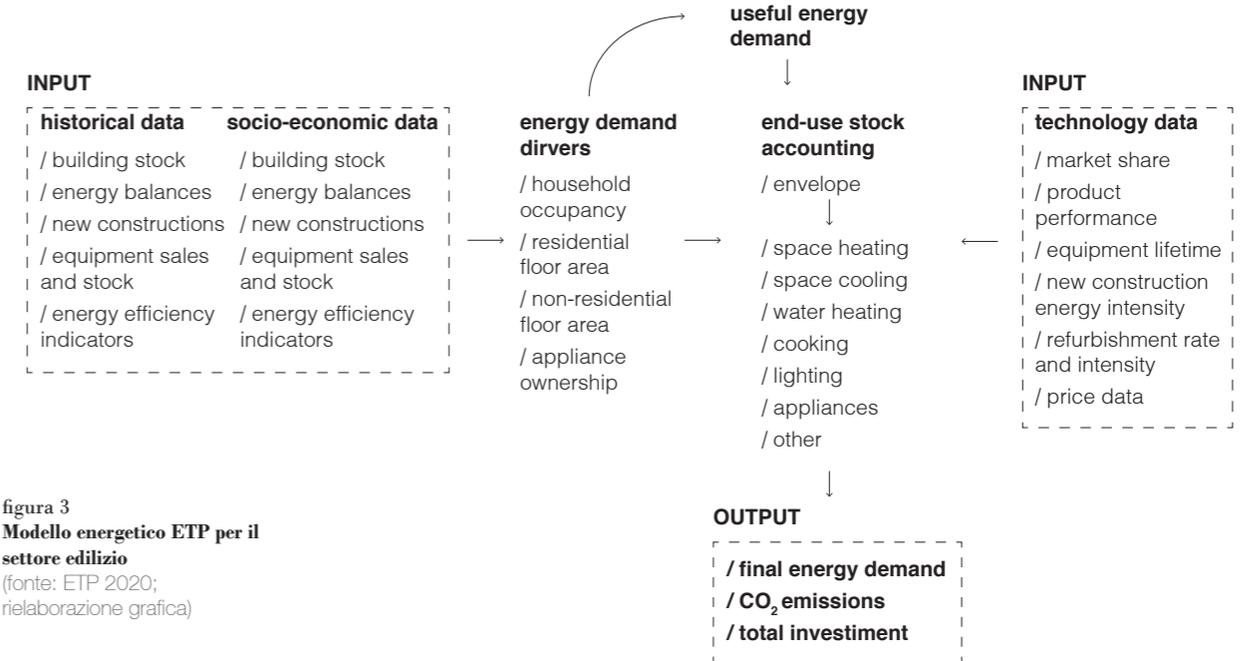
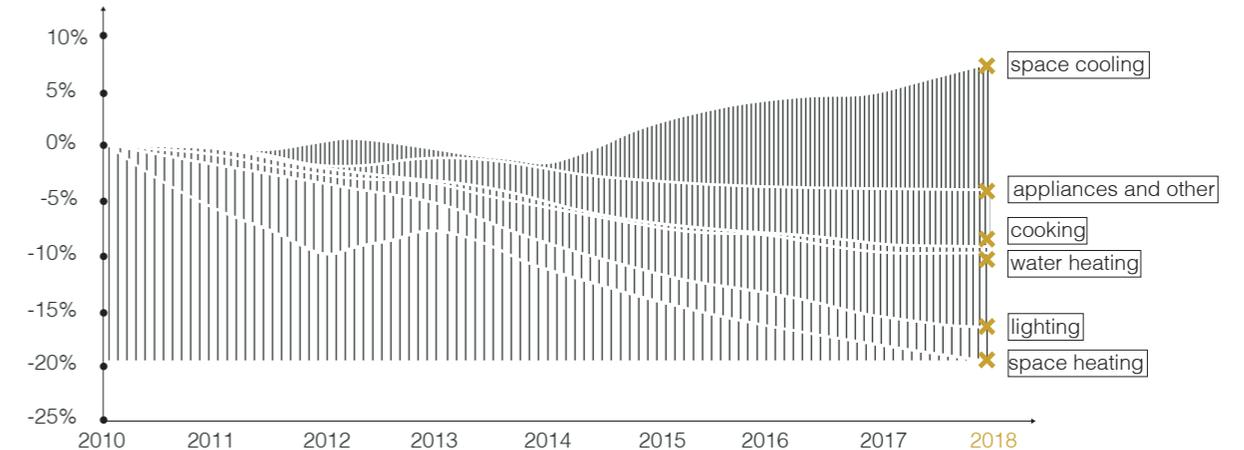


figura 3
Modello energetico ETP per il settore edilizio
(fonte: ETP 2020; rielaborazione grafica)

figura 4
Intensità energetica del settore edilizio globale per uso finale
(fonte: IEA Global Status 2019; rielaborazione grafica)



“ BUILDINGS ARE BAD FOR THE CLIMATE ”

BILL GATES
28.10.2019

(a destra)
Quarry Bay, Hong Kong
fotografia di Steven Wei



1.4 SGUARDO SULL'EUROPA

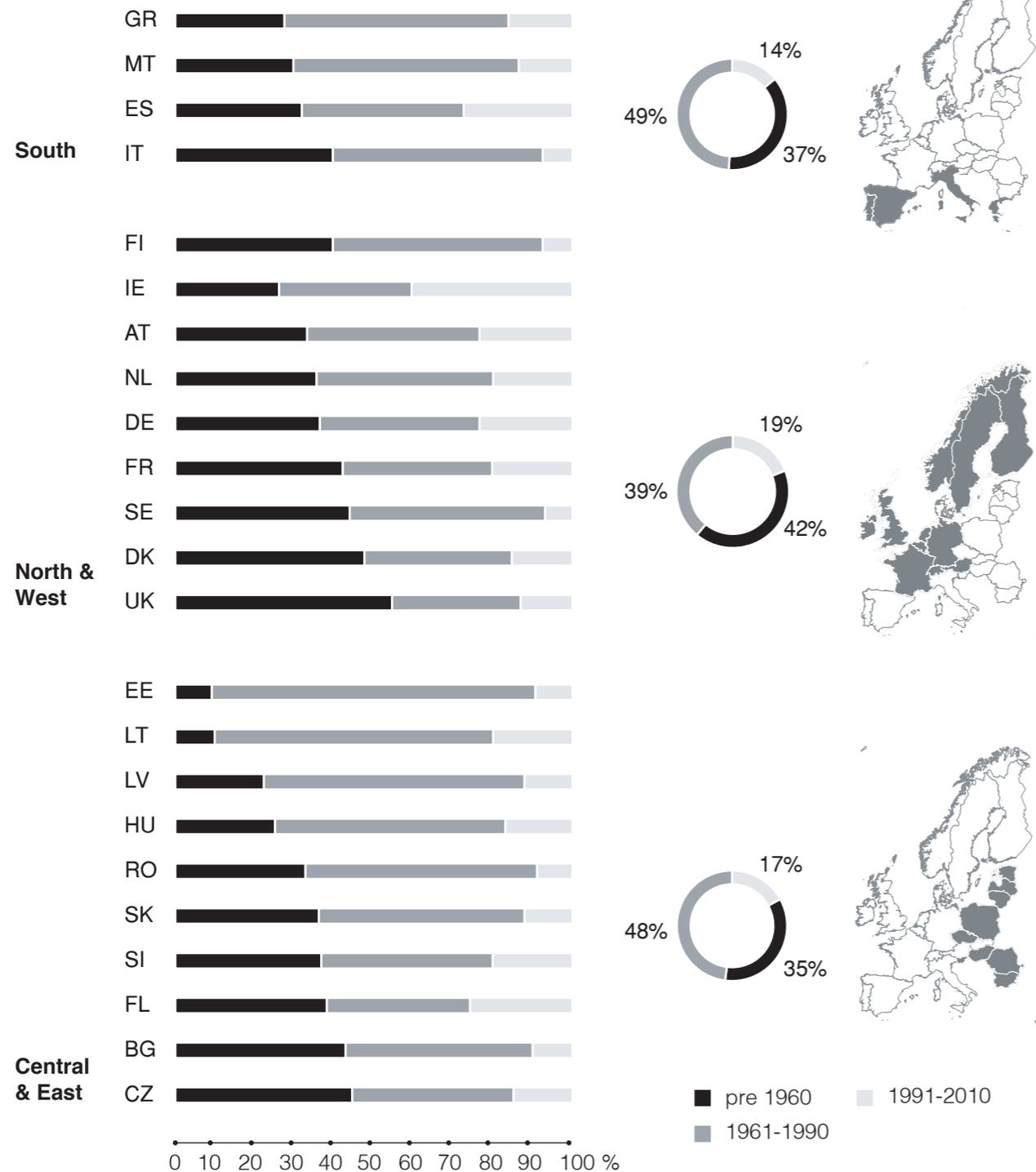
Se nelle economie emergenti la domanda energetica degli edifici è fortemente vincolata all'aumento della popolazione, il patrimonio edilizio europeo ha un tasso di crescita annuale del settore residenziale di circa 1%, mentre la maggior parte dei Paesi ha registrato una diminuzione del tasso di nuove costruzioni negli ultimi anni. (BPIE 2011)

Questo implica che ad oggi il settore edilizio dominante in Europa è quello della riqualificazione, con una percentuale che secondo il report di OpenEXP dal 2005 al 2015 è aumentata dal 46% al 57%, superando il mercato della nuova costruzione. (OPENEXP)

Siccome il settore residenziale copre il 75% di tutto l'ambiente costruito europeo, i consumi energetici da limitare maggiormente e le rispettive emissioni di CO₂ sono da attribuire agli edifici residenziali, che per più dell'80% sono stati costruiti prima delle direttive sull'efficienza energetica degli edifici (EPBD) **figura 1**; la prima di queste risale al 2002 ed introduceva la certificazione energetica degli edifici. (2002/91/CE) Questo specifico andamento del ciclo edilizio, con il suo picco di domanda di nuovi alloggi antecedente al nuovo millennio, rende oggi il patrimonio edilizio uno dei più importanti consumatori di energia con emissioni di CO₂ di circa il 36%. (BPIE 2011)

L'introduzione delle prime direttive sull'efficientamento energetico degli edifici dei primi anni 2000, però, non è l'unica componente significativa per inquadrare gli attuali ragionamenti sui consumi energetici, che derivano invece dalla prima crisi energetica del '73 causata dalla guerra dello Yom Kippur.

La crisi energetica che verrà a più riprese citata in merito all'utilizzo del fotovoltaico integrato nei paragrafi 2.4 *Evoluzione del BIPV* e 4.4 *Altre traiettorie di ricerca* è stata causata dall'embargo del petrolio e dal successivo drastico aumento dei prezzi, decisione dei Paesi esportatori di petrolio e alleati di Egitto e Siria nella guerra Kippur per punire i Paesi Occidentali, sostenitori di Israele.



Come risposta alla crisi, una maggiore sensibilità e consapevolezza determinarono le prime politiche di contenimento dei consumi di combustibile, spostando quindi l'interesse anche nel settore delle costruzioni verso i primi ragionamenti sui consumi energetici: isolamento termico, attrezzature per la misurazione ed il controllo dei consumi, l'adeguamento dei servizi, i primi impianti di riscaldamento autonomo sono aspetti che caratterizzavano la costruzione dei nuovi alloggi ed il recupero del patrimonio edilizio. (Sinopoli, Tatano, 2002) Nell'87 il rapporto Brundtland rilasciato dalla World Commission on Environment and Development, conosciuto anche come "Our Common Future", introduceva per la prima volta il concetto di "sviluppo sostenibile", come "development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (Brundtland 1987)

(a sinistra)
figura 1
Quota della superficie residenziale europea per periodi storici
(fonte: BPIE 2011; rielaborazione grafica)

(a destra)
Autostop a Beaverton, OR, a causa della carenza di gas
<https://www.grayflannelsuit.net/blog/photo-gallery-1973-74-united-states-oil-gas-crisis>



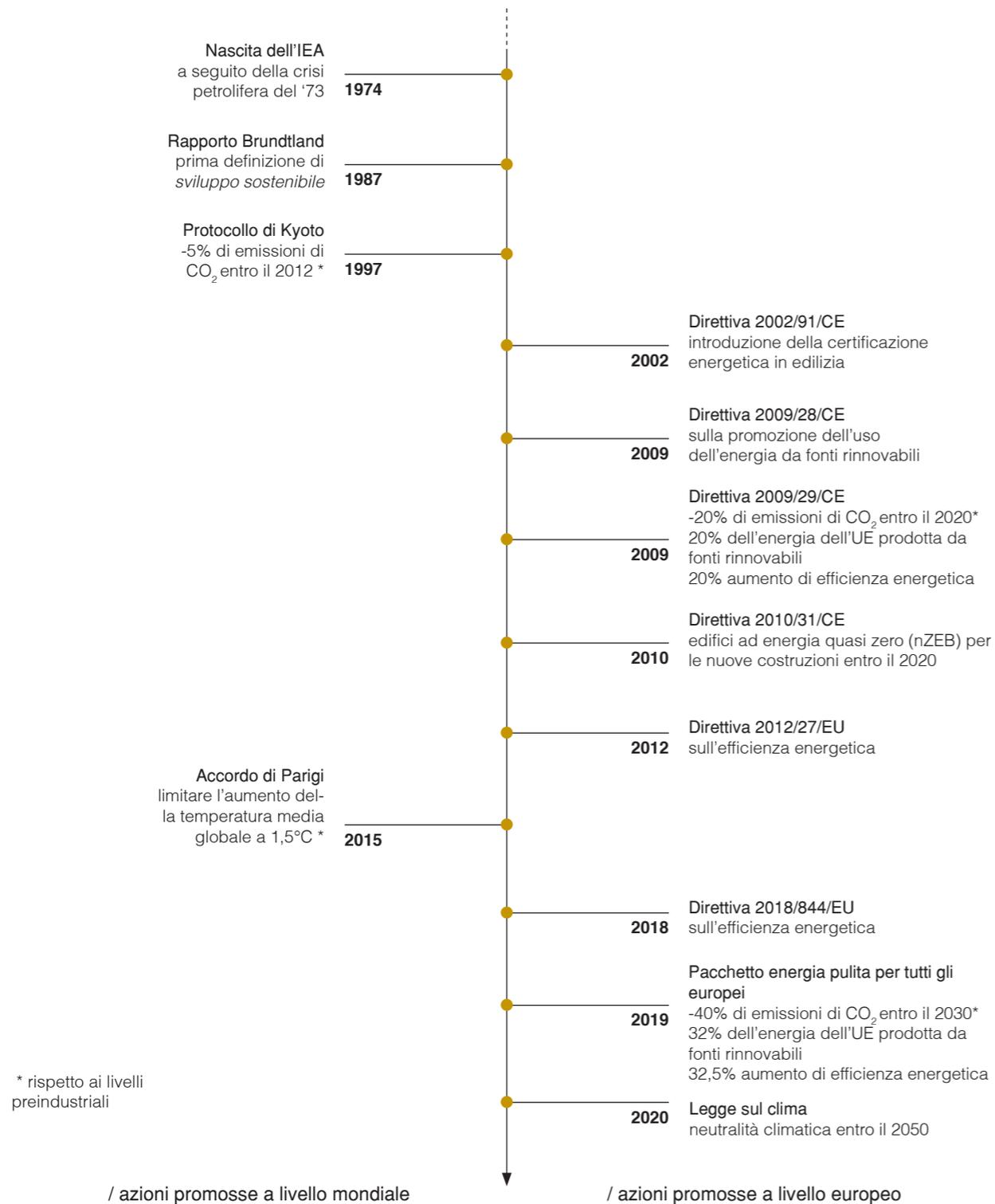
Nonostante l'esperienza degli anni Settanta avesse introdotto le prime riflessioni sui consumi energetici e le rispettive conseguenze sul modo di costruire, negli anni successivi alla crisi quella vicenda non aveva limitato l'utilizzo di combustibili fossili per la fornitura energetica degli edifici; questo riporta le riflessioni ad oggi, in un'Europa dove il settore delle costruzioni continua ad essere uno dei principali consumatori di energia a causa di un patrimonio edilizio ancora poco efficiente. È così, quindi, che le riflessioni sulle emissioni di GHG prodotte dal sistema di approvvigionamento energetico del patrimonio edilizio sono sfociate nelle prime direttive europee sull'efficientamento energetico degli edifici.

A tale scopo si evidenzia l'*Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) e le altre direttive relative alla riduzione dei consumi energetici nel settore delle costruzioni, tra cui:

- La prima versione dell'EPBD con la Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico degli edifici, che ha introdotto la **certificazione energetica degli edifici** e la relativa metodologia di calcolo; (2002/91/CE)
- L'EPBD è stata modificata nel 2010 con Direttiva 2010/31/CE sul rendimento energetico nell'edilizia. Entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione devono essere edifici ad energia "quasi" zero, mentre entro il 31 dicembre 2018 lo dovevano essere tutti quelli occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi. (2010/31/UE) "**edificio a energia quasi zero: edificio ad altissima prestazione energetica, determinata conformemente all'allegato I. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze. [...] Gli stati membri provvedono affinché: a) entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici ad energia quasi zero; b) a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero.**"
- Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che imponeva il **20% di efficienza energetica** presente nel piano europeo 20-20-20 (2012/27/UE)

- Nell'ambito del pacchetto Energia pulita per tutti gli europei, L'EPBD del 2010 è stata rivisitata nella Direttiva 2018/844/UE (EPBD) che modifica la Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia 2010/31/UE e la direttiva sull'efficienza energetica 2012/27/UE (2018/844/UE)

Nonostante le direttive sopracitate, il settore delle costruzioni si muove con grande ritardo in questa corsa alla transizione energetica con un 75% di patrimonio edilizio europeo ancora inefficiente dal punto di vista energetico; per tale motivo ogni Stato membro ha dovuto presentare nei propri piani nazionali integrati per l'energia e il clima (NECP) le rispettive strategie in ambito di efficienza energetica degli edifici.



1.5 IL FUTURO DELLE ENERGIE RINNOVABILI

I precedenti paragrafi hanno descritto una condizione di necessità e di tempestiva reazione al cambiamento climatico, rappresentando il punto di partenza per costruire i futuri scenari di decarbonizzazione.

Quando nel 2015 i 196 Paesi si sono riuniti per firmare l'Accordo di Parigi con l'obiettivo di limitare l'aumento della temperatura media globale a 1,5°C e non superare i 2 °C rispetto ai livelli pre-industriali, l'accordo ha implicato che le parti comunicassero i propri contributi determinati a livello nazionale (i *Nationally Determined Contributions NDCs*), ovvero i rispettivi obiettivi nazionali e le proprie azioni per raggiungere l'obiettivo comune¹. Ciò nonostante, il gap tra le direzioni intraprese dagli Stati e quella necessaria per raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi è ancora ampio e tende ad aumentare (IRENA 2021): dall'anno di pubblicazione dello *Special Report on Global Warming of 1,5 °C* dell'IPCC nel 2018 (IPCC 2018), infatti, la curva globale delle emissioni di GHG è aumentata, contrariamente alla dichiarazione dell'IPCC di una necessaria riduzione del 45% dei GHG entro il 2030.

Sulla base di quando dichiarato da ciascun NDC, il recente lavoro *World Energy Transitions Outlook* pubblicato a Marzo 2021 dall'International Renewable Energy Agency (IRENA) fornisce infatti delle proiezioni sugli scenari energetici futuri e futuribili, distinguendo lo scenario energetico pianificato (*Planned Energy Scenario PES*), costruito attraverso gli attuali piani energetici degli Stati e non abbastanza ambizioso per raggiungere gli obiettivi stabiliti, e lo scenario 1,5°C (*1,5°C Scenario 1,5-S*) proposto da IRENA che descrive un percorso di transizione allineato all'ambizione del 1,5°C. Seguendo il Planned Energy Scenario, infatti, le emissioni annuali di CO₂ raggiungeranno le 36,5Gt, invece di tendere a zero come tracciato dal 1,5°C Scenario. **figura 1**

Coerentemente con quanto affermato anche da altre organizza-

1. Gli NDCs vengono presentati ogni cinque anni alla segreteria dell'UNFCCC *Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici*; tutte le parti sono state invitate a presentare i nuovi NDCs entro il 2020

zioni, come nella pubblicazione *Global Energy Perspective 2021* di McKinsey&Company (McKinsey&Company 2021), la transizione in atto è troppo lenta per raggiungere gli obiettivi prefissi e servono azioni più rapide.

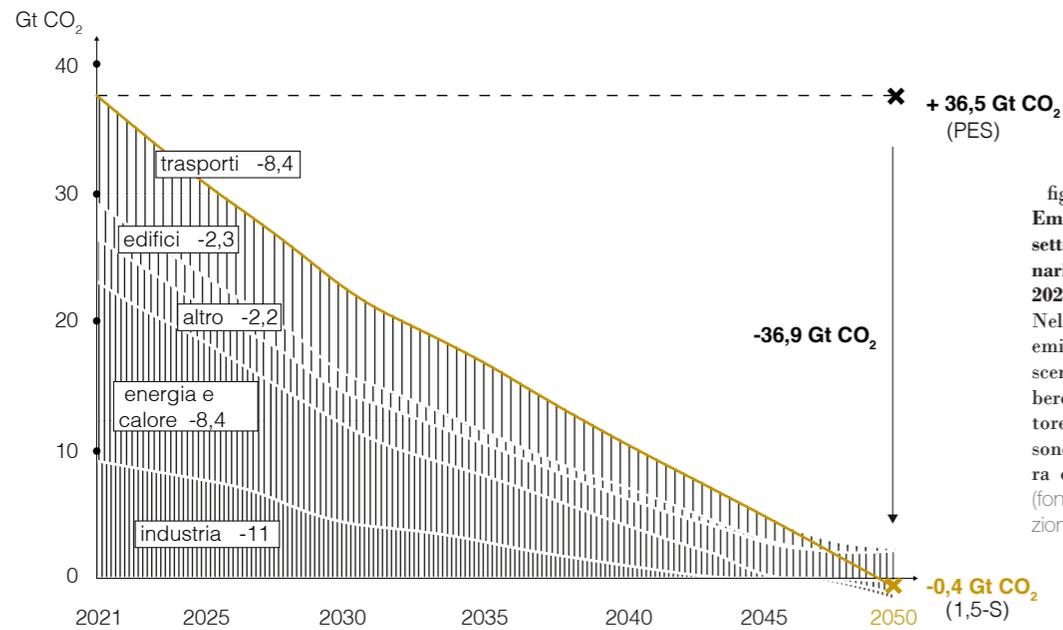


figura 1
Emissioni di CO₂ globali per settori. Proiezioni degli scenari PES e 1,5-S per il periodo 2021-2050
Nel complesso, nel 2050 le emissioni nette di CO₂ nello scenario 1,5-S raggiungerebbero -0,4 Gt perchè per il settore industriale ed energetico sono previste misure di cattura e rimozione del carbonio. (fonte: IRENA 2021; rielaborazione grafica)

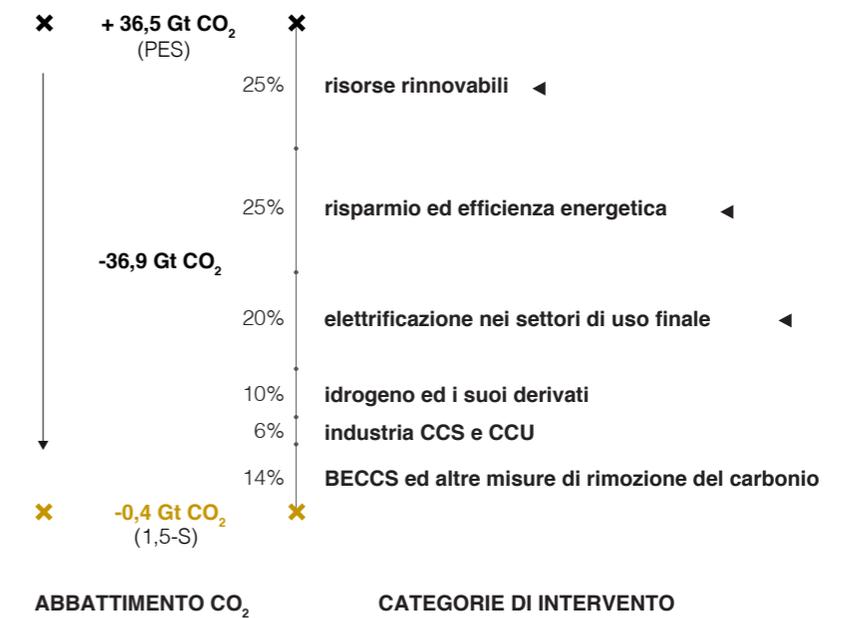
figura 2
Categorie di intervento
Riduzione delle emissioni di CO₂ dello scenario 1,5-S rispetto allo scenario PES all'anno 2050.

L'abbattimento stimato dell'emissione di CO₂ include anche le emissioni derivanti da usi non energetici. (1) le rinnovabili comprendono l'uso diretto di calore e biomassa (2) il risparmio energetico comprende la riduzione della domanda energetica (3) l'elettrificazione comprende l'uso diretto di elettricità per i trasporti e la produzione del calore (4) l'idrogeno include combustibili e materie prime sintetiche (5) CCS indica la cattura e lo stoccaggio del carbonio, CCU indica la cattura e l'utilizzo del carbonio (6) BECCS e altre misure di rimozione del carbonio includono la bioenergia accoppiata con CCS (BECCS) nella generazione di elettricità e calore (fonte: IRENA 2021; rielaborazione grafica)

Le sei categorie individuate da IRENA su cui intervenire per azzerare le 36,5 Gt di CO₂ del Planned Energy Scenario sono:

- / le risorse rinnovabili
- / il risparmio e l'efficienza energetica
- / l'elettrificazione dei settori ad uso finale di energia
- / l'idrogeno ed i suoi derivati
- / la CCS e la CCU (*carbon capture and storage* e *carbon capture and utilisation*)
- / la BECCS (*bioenergy with CCS*)

Di queste sei categorie, le energie rinnovabili, l'elettrificazione e l'efficienza energetica rappresentano i principali strumenti della transizione energetica. figura 2 (IRENA 2021)



Seguendo la traiettoria delineata da IRENA per raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi, la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili dovrà aumentare dal 25% del 2018 al 90% nel 2050 ed il 63% di queste dovrà essere fornito dall'energia solare ed eolica², motivo per cui saranno necessari maggiori investimenti sui sistemi energetici

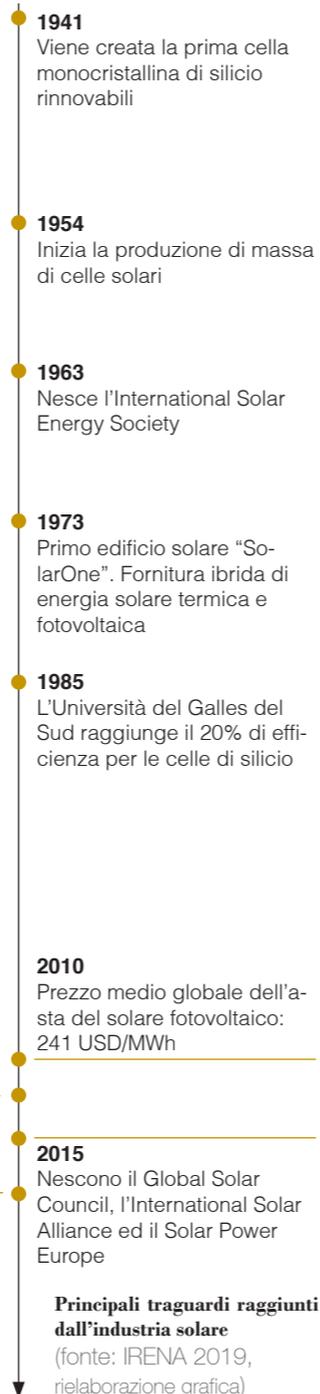
È chiaro, quindi, come la produzione di energia solare assuma un ruolo chiave per l'attuale sfida energetica ed una sua radicale implementazione risulti necessaria in tutti i settori, compreso chiaramente quello delle costruzioni.

Tra le fonti rinnovabili, l'energia solare prodotta da impianti fotovoltaici ha già dimostrato di essere tra le tecnologie energetiche una delle più mature ed in più rapida ascesa (crescita che tuttavia dovrà accelerare per rispondere all'attuale cambiamento climatico), risultato ottenuto anche attraverso il significativo calo del costo dell'energia prodotta da fonti rinnovabili. Tra il 2010 ed il 2018, infatti, il costo globale medio dell'energia prodotta dal fotovoltaico è calato del 77%, rendendo oggi il PV già competitivo sul mercato rispetto alle risorse fossili; in aggiunta, le previsioni di IRENA descrivono per i prossimi decenni un continuo andamento in discesa dei costi dell'energia rinnovabile. (IRENA 2019)

² L'energia solare e quella eolica vengono anche definite come fonti rinnovabili variabili, a causa della loro variabilità dovuta al naturale percorso solare ed alla variabilità di venti

2012
100 GW elettricità fotovoltaica cumulata mondiale

2018
Capacità solare globale installata 480 GW
Prezzo medio globale dell'asta del solare fotovoltaico: 85 USD/MWh
Fotovoltaico off-grid 2,94 GW



L'attuale sfida energetica ed il maggior peso affidato all'energia rinnovabile, all'elettrificazione e all'efficienza energetica quali driver della transizione (IRENA 2021) implicano nuovi paradigmi per il sistema energetico, che deve saper integrare queste fonti energetiche rinnovabili, essere affidabile e ridurre le emissioni di GHG.

Tuttavia, l'attuale sistema di produzione e di distribuzione dell'energia non è adeguato al raggiungimento di tali obiettivi e si basa su uno schema gerarchico secondo cui il flusso di energia si muove dalla centrale elettrica agli utenti in modo unidirezionale. (Moura et al. 2013)

Il processo di elettrificazione proposto dai comuni scenari di decarbonizzazione che porta all'aumento del consumo di elettricità, unito ad un aumento della quota di energia prodotta da risorse rinnovabili variabili (fotovoltaico ed eolico), pone le basi per una ideale infrastruttura energetica più flessibile e decentralizzata, in cui i flussi di energia, e quindi le relative perdite energetiche, sono ridotti, aumentando l'efficienza. Alla base di questa trasformazione c'è il concetto di una rete di distribuzione energetica bidirezionale definita come *Smart Grid*, in cui i flussi energetici possono muoversi dagli impianti di produzione all'utenza e viceversa a seconda della domanda energetica, la produzione energetica avviene in maniera decentralizzata e sfrutta maggiori quote di energia rinnovabile e vengono inclusi sistemi di stoccaggio a breve e lungo termine per conservare l'energia prodotta³.

L'International Energy Agency IEA definisce la Smart Grid come "una rete elettrica che usa tecnologie digitali o altre tecnologie avanzate per monitorare e gestire il trasporto di energia tra tutte le fonti di produzione per soddisfare le diverse richieste di elettricità degli utenti finali" (IEA Smart Grids 2011) Lo scopo delle Smart Grids è quindi quello di massimizzare l'affidabilità, la resilienza e la stabilità di un sistema energetico basato sulla decentralizzazione e sulla produzione in loco di energia, minimizzando i costi e gli impatti ambientali. (Moura et al. 2013).

³ La variabilità dell'energia solare ed eolica non deve tuttavia compromettere l'affidabilità del sistema energetico che deve garantire una fornitura costante. A tale scopo, vengono inclusi nella rete strumenti di monitoraggio e stoccaggio energetico per compensare eventuali disaccoppiamenti tra la produzione energetica e la domanda dell'utenza

È in questo scenario energetico che gli edifici potranno assumere un ruolo chiave per la decarbonizzazione e la transizione energetica, passando da consumatori a produttori di energia.

Nella visione delle Smart Grids gli edifici dovranno coprire parte del proprio fabbisogno energetico in modo autonomo, sfruttando in misura sempre maggiore le risorse rinnovabili per la produzione energetica in loco e in tal modo minimizzando i flussi e le perdite di energia. Se la quantità di energia prodotta dall'edificio supera la domanda energetica registrata in quel momento, il surplus viene immesso nella rete elettrica e, viceversa, la rete elettrica garantisce la fornitura di energia nei momenti in cui l'edificio non può produrla (es. durante le ore notturne); questo sistema bidirezionale renderebbe gli edifici parte integrante di una comunità energetica decentralizzata.

figura 3

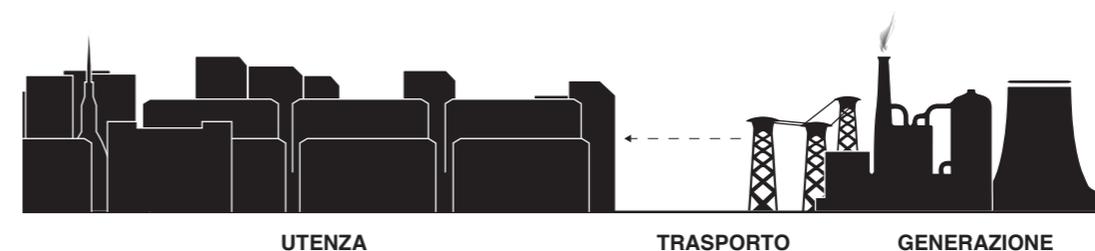
Una produzione locale più stabile di energia rinnovabile da parte di edifici che ospitano in maniera sempre più estesa componenti impiantistiche è una realtà già presente in alcuni contesti europei, seppur non ancora consolidata ed in percentuale ridotta.

Tra questi edifici, sono presenti quelle architetture capaci di integrare le componenti impiantistiche nel progetto di architettura, riconducendo l'esigenza energetica anche, e soprattutto, a strategie progettuali di qualità compositiva.

Stringendo il campo di analisi alla produzione energetica fotovoltaica, è quel passaggio che vede i tradizionali moduli fotovoltaici montati in copertura convertirsi in elementi progettuali appositamente selezionati ed integrati e che prende il nome di *Building Integrated Photovoltaics*, l'oggetto di discussione del presente lavoro di tesi.

figura 4

(a destra)
figura 3
Rappresentazione schematica della rete elettrica tradizionale e della Smart Grid
(Elaborazione propria)

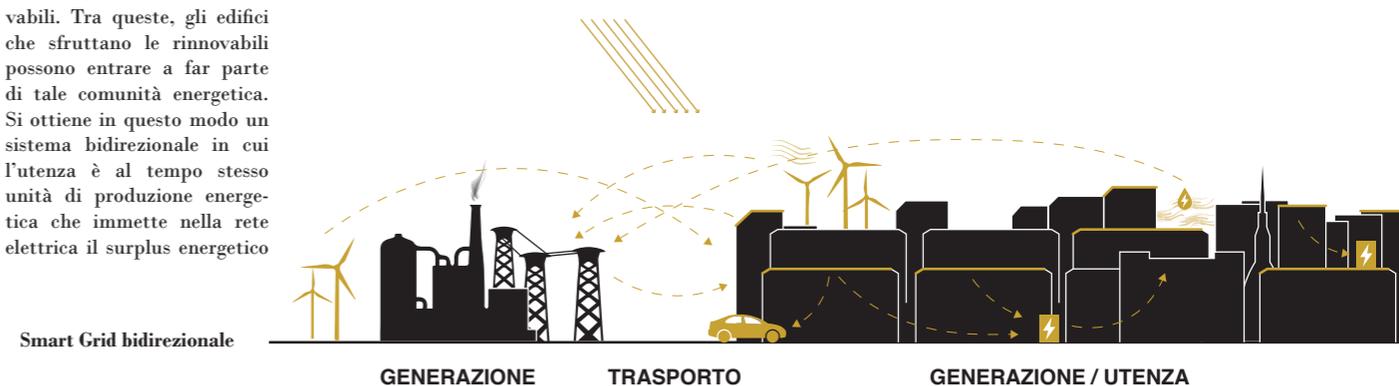


Rete elettrica tradizionale unidirezionale

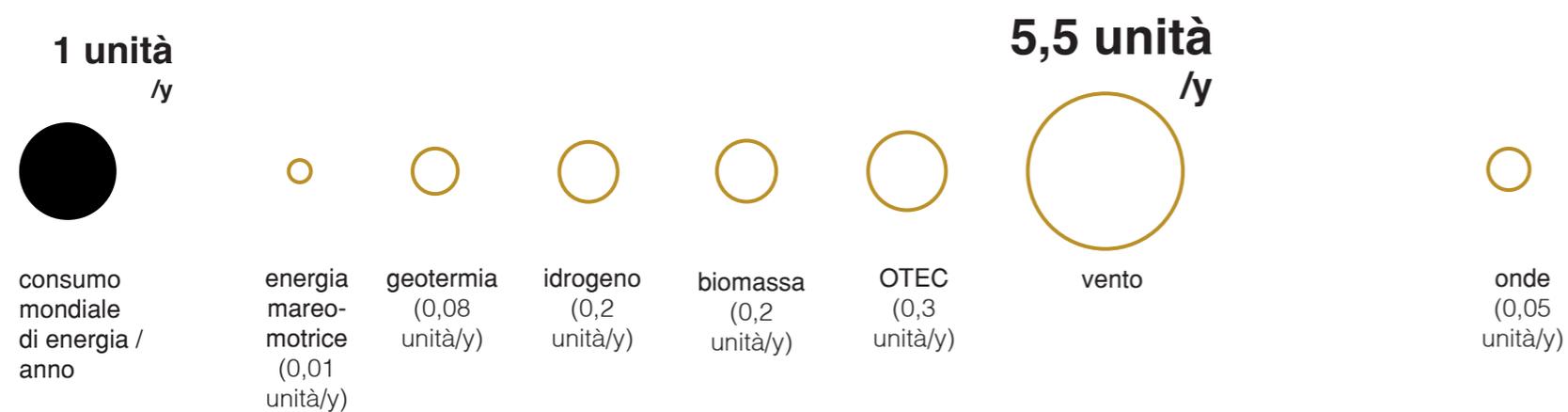
L'energia elettrica viene generata da grandi centrali elettriche distanti dai centri abitati, dotate di generatori generalmente alimentati dalla combustione di risorse fossili (energia termoelettrica) e da grandi masse d'acqua (energia idroelettrica). Per coprire la distanza tra le centrali elettriche e l'utenza occorre predisporre il trasporto dell'energia elettrica tramite reti di trasmissione ad alta o altissima tensione (AT o ATT).

L'energia elettrica viene generata da un sistema distribuito e decentralizzato. Le centrali elettriche sono di dimensioni ridotte e vengono supportate da altre unità di produzione energetica più piccole dislocate sul territorio che sfruttano fonti rinnovabili. Tra queste, gli edifici che sfruttano le rinnovabili possono entrare a far parte di tale comunità energetica. Si ottiene in questo modo un sistema bidirezionale in cui l'utenza è al tempo stesso unità di produzione energetica che immette nella rete elettrica il surplus energetico

quando non utilizzato, mentre la rete elettrica garantisce la fornitura energetica quando necessaria. In altri casi, il surplus energetico può essere conservato negli accumulatori elettrici (batterie).



Risorse annuali da fonti energetiche rinnovabili



1243 unità /y

onde
(0,05
unità/y)

solare

Rapporto annuale tra il consumo mondiale di energia e l'energia prodotta da ciascuna fonte energetica rinnovabile

(fonte: Perez R. *et al.* 2015);
rielaborazione grafica)

figura 4
CIS Nordhavn
CF Moller Architects
Copenhagen, DK
www.cfmoller.com



1.6 RIFLESSIONI

Questo primo capitolo fornisce una panoramica sulla condizione attuale e quella di un prossimo futuro nel quale si inserirà il settore delle costruzioni, un contesto in cui la componente energetica, e di conseguenza quella impiantistica, acquisteranno sempre maggiore rilievo; per raggiungere gli obiettivi prefissi al 2030 e successivamente al 2050, infatti, un utilizzo più assiduo di fonti di energia rinnovabile per l'ambiente costruito, quali gli impianti fotovoltaici, il solare termico, la geotermia ecc. risulta una condizione assolutamente necessaria per la sua trasformazione, ma è una condizione che per la sua stessa natura fisica e quindi visibilità ha in alcuni casi peggiorato la qualità complessiva del progetto architettonico.

Descrivendo le traiettorie intraprese dall'Unione Europea per l'efficiamento energetico del settore edilizio, lo scopo di questo capitolo è quello di contestualizzare il ruolo del progetto di architettura in questa trasformazione già in atto e di colmare, pertanto, il divario esistente tra architettura e tecnologia (tecnologia intesa in questo caso come integrazione impiantistica).

Come dimostrerà il contributo del lavoro di tesi, infatti, da un lato è necessario che la progettazione della componente impiantistica, indispensabile per aumentare l'efficienza energetica dell'edificio, tenga necessariamente conto di una maggiore integrazione nell'involucro quale elemento del progetto architettonico. Alcuni degli esempi riportati dimostreranno, quindi, la capacità del progetto di architettura di gestire anche gli aspetti più tecnici riferibili al settore energetico, con un approccio trasversale ed olistico. **Il tema in questione si traduce quindi nella progettazione di architetture capaci di gestire in modo più esaustivo le fonti rinnovabili, al fine di ricondurre l'esigenza energetica a strategie progettuali di elevata qualità compositiva e di integrazione nel contesto.**

Dall'altro lato, però, verrà delineato un differente approccio all'integrazione impiantistica nel progetto di architettura, in cui il merito

di un'evoluta integrazione non va esclusivamente ascritto alla capacità di visione olistica dell'architetto, ma all'approccio interdisciplinare adottato: se alcune architetture dimostreranno la capacità di fare proprie delle soluzioni impiantistiche per tradurle in *concept* architettonici, verranno altrettanto presentati casi studio in cui è la ricerca internazionale, affiancata da determinate aziende produttrici, a rappresentare il maggiore traino verso l'innovazione di soluzioni integrate nel progetto di architettura, adottando un modello organizzativo di tipo sinergico; l'architetto diventa quindi uno degli operatori di un processo in cui il ruolo chiave viene giocato anche, e soprattutto, dal mondo della ricerca e della produzione industriale. **Tali modelli innovativi, pertanto, dimostreranno come talvolta un progetto di architettura evoluto sotto il profilo dell'integrazione impiantistica, ovvero che tale integrazione impiantistica venga inclusa in una visione progettuale di insieme, sia il risultato del lavoro congiunto di ricerche universitarie, imprese di produzione e progettisti, secondo un modello collaborativo che mira ad obiettivi comuni. All'interno di questa rete organizzativa, il ruolo dell'architetto sarà quello di farsi carico degli sviluppi tecnologici apportati da tale filiera collaborativa e trasferirli, pertanto, nell'architettura.**

Come verrà trattato più dettagliatamente nei capitoli successivi, l'architetto è così chiamato a compiere lo sforzo di intravedere il potenziale che il progetto di architettura acquista quando riesce a combinare in una visione complessiva gli aspetti tecnologici che l'innovazione tecnologica, veicolata dalla ricerca e delle imprese, mette a disposizione.

Riconoscere e trovare una risposta alle esigenze di una società è un compito che caratterizza la figura dell'architetto fin dalle sue origini. Sospeso tra l'arte e la tecnica, l'architetto è una figura poliedrica che si inserisce in modo trasversale nei campi della sociologia, della politica, dell'economia e conseguentemente il suo prodotto, l'architettura, è *“un'arte complessa che abbraccia forma e funzione, simbolo e fine sociale, tecnica e fede”*. (CURTIS 1996) Quello che William J. R. Curtis affermava riferendosi all'architettura del '900 è una definizione sempre valida che oggi va calata e declinata nel contesto attuale. **Da qui la necessità che gli architetti comprendano quanto le loro scelte influenzino, positivamente o negativamente, l'ambiente circostante e come rappresentino figure indispen-**

sabili per trasformare i limiti imposti in opportunità, impedendo quel processo di trasformazione che vede il progetto di architettura convertirsi in sola ottemperanza di requisiti tecnici.

Altra considerazione necessaria ai fini di una corretta lettura del lavoro di tesi e connessa con quanto accennato in precedenza è il tema dell'innovazione tecnologica nel settore delle costruzioni. Dalla panoramica sulla condizione del patrimonio edilizio e dalla traiettoria intrapresa dall'Unione Europea verso un mercato rivolto alla sostenibilità ambientale, deve essere chiaro che **gli obiettivi ribaditi dalla Presidente della Commissione Europea Ursula von der Leyen possono essere raggiunti solo con approcci più maturi, modelli di innovazione capaci di modificare le dinamiche del settore delle costruzioni**. Questo tema porta inevitabilmente a collegare il progetto di architettura con il settore delle costruzioni nel quale si inserisce, un settore, però, che il paragrafo 4.5 *Approcci interdisciplinari* descriverà come un campo ancora arretrato ed incapace di assimilare l'innovazione tecnologica. A tale scopo il lavoro di tesi si soffermerà sull'analisi di casi studio che possono rappresentare dei possibili modelli di confronto, in cui l'utilizzo di sistemi impiantistici come parte del linguaggio di un progetto di architettura si inserisce in un contesto più ampio dove il settore delle costruzioni sa integrare l'innovazione tecnologica.

“ An acceptance of solar technology in construction by the general public can only be achieved by means of convincing visual ideas and example [...] the use of environmentally friendly forms of energy must be planned from a holistic point of view. [...] Renewable forms of energy present an opportunity to make life in cities more attractive. ”

Thomas Herzog
Charter for Solar Energy in
Architecture and Urban Planning, 2007)

Definizioni ed unità di misura

2.1 Un nuovo componente edilizio

2.2 Forme di integrazione e possibili interpretazioni

2.3 Cosa hanno da offrire le facciate

2.4 Evoluzione del BIPV

2.5 Panorama europeo: casi studio selezionati

2.6 Approfondimenti

2.6.1 Tecnologia fotovoltaica: prima, seconda e terza generazione

2.6.2 Stratigrafia dei moduli BIPV

2.6.3 Caratteristiche formali

2 / I caratteri del BIPV

Alla sua fondamentale funzione di protezione dall'ambiente esterno, la facciata di un edificio deve garantire il benessere dell'utenza, servendo come filtro tra l'ambiente interno ed esterno: a tal fine fattori come l'isolamento termico, la qualità dell'aria scambiata, la ventilazione, l'umidità, l'isolamento acustico, il rapporto tra visibilità e privacy hanno guidato la storia della progettazione dell'involucro verso soluzioni sempre più evolute. (Herzog, Krippner, Lang, 2017) È importante, infatti, che il progetto di architettura ottimizzi le interazioni tra microclima interno ed esterno sfruttando strategie di involucro passive per ridurre la domanda energetica degli edifici. La capacità dell'involucro di incidere sulla domanda energetica e di conseguenza sui rispettivi consumi è infatti opinione condivisa ed ampiamente trattata, con il costante riferimento all'energia solare. (Herzog, Krippner, Lang, 2017) (RIBA 2009)

*La necessità di intervenire sul settore delle costruzioni per aumentare l'efficienza energetica sia nel progetto di nuova costruzione che nel retrofit del patrimonio edilizio si è quindi tradotta e continua a tradursi in una crescente maturità della progettazione dell'involucro, che raggiunge oggi un punto di transizione. **Al di là della capacità di sfruttare l'energia solare in modo passivo, i continui sviluppi del settore tecnologico portano infatti a rielaborare ed ampliare il concetto di involucro, quale filtro tra ambiente interno ed esterno, e concepirlo come un elemento dinamico e attivo.** Da un lato, l'innovazione tecnologica ha guidato verso la progettazione di soluzioni adattive che possono ridurre ulteriormente la domanda energetica; sono componenti dinamici capaci di reagire agli stimoli esterni ed interni e regolare autonomamente valori come l'illuminazione e la temperatura degli ambienti interni. (Zaera-Polo, Trüby 2014) Dall'altro, principale aspetto di interesse per questo capitolo ed in maniera più estesa per questo lavoro di tesi, la considerazione che l'involucro sia un componente attivo e capace di sfruttare le condizioni esterne come fonti rinnovabili per generare energia; in questo caso il riferimento all'uso dell'energia*

solare nella sua forma attiva. Se le strategie passive per il guadagno solare fanno parte della storia dell'architettura fin dalle origini, le tecnologie attive implicano l'utilizzo di componenti impiantistici esterni che ancora non sono stati totalmente assorbiti dal linguaggio architettonico, come per esempio gli impianti fotovoltaici ed i collettori termici. (Task 41.A.2) Come accennato nel capitolo precedente, infatti, la forte spinta verso l'uso di risorse rinnovabili per gli edifici deve necessariamente includere una progettazione impiantistica attenta anche, e soprattutto, all'integrazione nel progetto di architettura.

A tale scopo, il seguente capitolo si sofferma sulla descrizione di un sistema fotovoltaico più evoluto rispetto alla consueta applicazione di moduli fotovoltaici in copertura, che sta segnando la strada verso nuove possibilità di integrazione nel linguaggio architettonico, con particolare interesse verso l'integrazione in facciata. *Per chiarezza, quindi, la trattazione terrà sempre conto della distinzione tra il concetto di Building Applied Photovoltaics (BAPV), ovvero l'applicazione di moduli PV come impianto esterno e quello di Building Integrated Photovoltaics (BIPV), principale oggetto di riflessione, che inquadra il fotovoltaico come un nuovo prodotto e sistema costruttivo per l'involucro.*

La finalità di questo capitolo è fornire gli strumenti di lettura necessari alla comprensione dei capitoli successivi, motivo per cui la trattazione seguente non è da considerarsi una descrizione esaustiva dei sistemi fotovoltaici integrati, bensì segue una struttura puntuale e mirata all'obiettivo finale.

Definizioni e unità di misura

Irradianza (W/m^2)

L'irradianza è la potenza per unità di superficie proveniente dal Sole, ovvero la densità della radiazione solare.

Per calcolare la potenza di picco dei moduli fotovoltaici in condizioni di prova standard, si assume come irradianza il valore pari a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$.

Irraggiamento ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{giorno}$)

L'irraggiamento rappresenta la quantità di energia solare incidente su una superficie unitaria in un determinato intervallo di tempo, tipicamente un giorno.

A differenza dell'irradianza, l'irraggiamento dipende dalla posizione geografica ed in Italia varia da $3,6 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{giorno}$ in Trentino-Alto Adige a $5,5 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{giorno}$ in Sicilia.

Standard Test Conditions (STC)

STC rappresenta lo standard adottato nel settore del fotovoltaico per misurare la potenza dei moduli PV e per poterli confrontare. Ciascun modulo è sottoposto a tre condizioni fisse:

- / temperatura delle celle PV pari a 25°C
- / irradianza solare pari a $1000 \text{ W}/\text{m}^2$
- / massa d'aria pari a 1,5 (quantità di atmosfera che la radiazione solare deve attraversare per colpire la terra)

Rendimento

L'efficienza massima di un modulo fotovoltaico si aggira attorno al 20%, ovvero solo il 20% della radiazione solare incidente viene convertita in energia elettrica. Questo risultato deriva dal calo delle prestazioni che il fotovoltaico subisce quando si surriscalda, condizione che si verifica in ambiente operativo dove la temperatura del fotovoltaico raggiunge circa gli 80°C . Altri fattori esterni come l'angolo di tilt, l'angolo azimutale, l'ombreggiamento, uniti a quelli interni dell'impianto fotovoltaico, possono contribuire al calo del rendimento.

Autoconsumo

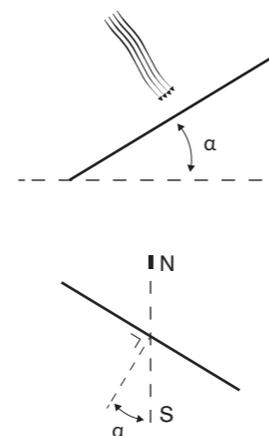
L'autoconsumo consiste nella possibilità di consumare in loco (nella propria abitazione, in un ufficio, in uno stabilimento produttivo, ecc.) l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico per far fronte ai propri fabbisogni energetici. (definizione fornita da GSE Gestore Servizi Energetici).

Angolo di tilt (inclinazione)

L'angolo di tilt è quello che il modulo fotovoltaico forma con il piano orizzontale, ovvero la sua inclinazione. Nell'emisfero boreale, alle latitudini del centro Europa, l'angolo di tilt ottimale per massimizzare la produzione energetica varia dai 30° ai 35° .

Angolo azimutale (orientamento)

L'angolo di azimut è quello formato tra la proiezione sul piano dell'orizzonte della perpendicolare al modulo fotovoltaico e la direzione Sud.



watt (W)

Il watt è l'unità di misura della potenza ed esprime la quantità di energia in J (Joule) che viene consumata (o generata) ogni secondo.

In termini elettrici, 1 Watt corrisponde alla potenza generata da 1 Ampere di corrente che scorre sotto l'influsso di un potenziale di 1 Volt (V).

$$W = J / s = A \times V$$

kilowattora (kWh)

Il kWh esprime la quantità di energia elettrica che viene fornita (o comperata) dall'azienda di distribuzione e si calcola come il prodotto di una potenza (espressa in kilowatt) e un tempo (espresso in ore), durante il quale la potenza viene erogata.

$$kWh = kw \times h$$

watt di picco (Wp)

Il Wp esprime la potenza nominale di un modulo fotovoltaico misurata in condizioni di prova standard (STC - Standard Test Conditions). Un modulo fotovoltaico con tecnologia monocristallina o policristallina registra sotto condizioni standard una potenza di picco superiore ai 100 Wp/m²

$$Wp / m^2$$

2.1 UN NUOVO COMPONENTE EDILIZIO

Nelle trattazioni precedenti si è fatto cenno alla necessità di sfruttare maggiori fonti di energia rinnovabile, ed in particolare impianti fotovoltaici installati in ambiente costruito per rispondere alla sfida energetica europea, distinguendo tra impianti *applicati* (BAPV) e *integrati* (BIPV) in base alla funzione che assumono per l'edificio.

L'oggetto di interesse è quindi il *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV), un segmento del mercato fotovoltaico costituito da prodotti multifunzionali progettati per sostituire uno o più componenti edilizi e svolgerne la rispettiva funzione¹. Questa condizione di sostituzione rende il sistema integrato ben più complesso, quanto più interessante, di quello comunemente applicato, in quanto implica la convergenza e l'allineamento di discipline apparentemente distanti (la progettazione architettonica, l'integrazione impiantistica, il settore energetico, il mercato immobiliare, ecc.) che arricchisce il valore di ogni singolo progetto.

Come verrà descritto nel paragrafo 2.4 *Evoluzione del BIPV*, entrambi i sistemi BIPV e BAPV iniziavano ad essere diffusi in ambiente costruito intorno agli anni Settanta, in alcuni casi per la necessità di raggiungere aree remote, in altri perché guidati dalla ricerca o ancora per la maggiore sensibilità nata a seguito della prima crisi petrolifera del '73. Tuttavia, l'immaginario comune del fotovoltaico è il classico pannello scuro visibile sulle coperture, che rientra pienamente nella categoria BAPV, mentre la dimensione attuale del mercato BIPV è circa l'1% del mercato fotovoltaico globale, rappresentando quindi un contesto ancora di nicchia. (Osseweijer *et al.* 2018)

1. La multifunzionalità è la condizione necessaria perché si possa parlare di BIPV.

Il concetto di *fotovoltaico integrato*, *Building Integrated Photovoltaics*, implica soluzioni fotovoltaiche che, in virtù della loro stessa condizione di integrazione nell'edificio, sostituiscono uno o più componenti edilizi come quelli di copertura, facciata, infissi (unità tecnologiche di chiusura superiore e chiusura verticale dell'involucro) o quelli di protezione e separazione (unità tecnologiche di partizioni esterne). L'integrazione implica quindi la condizione di multifunzionalità, secondo cui devono essere garantite una o più funzioni complementari alla sola produzione energetica. Si veda il sottoparagrafo *Building Integrated Photovoltaics* alla pagina 82.

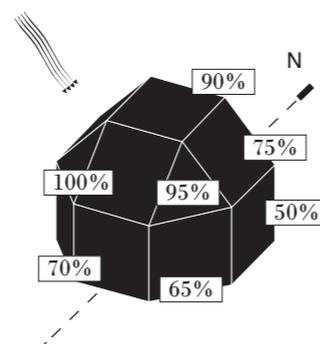
Building Applied Photovoltaics

Per *Building Applied Photovoltaic* si intende il sistema fotovoltaico installato in copertura, con l'unico scopo di produrre energia. Avendo come fine ultimo la sola produzione energetica, l'installazione del fotovoltaico quasi mai rientra nel concept iniziale del progetto e viene concepito come un corpo aggiunto a costruzione terminata, senza mai sostituire i materiali da costruzione. Il BAPV, quindi, non comporta modifiche all'unità tecnologica, se non l'installazione del sistema di fissaggio, tipo di applicazione che ne facilita l'installazione.

Poiché la produzione energetica dipende fortemente dall'orientamento (**angolo azimutale**) e dall'inclinazione (**angolo di tilt**) dei moduli, la pratica comune è quella di applicarli sulle coperture inclinate e orientate verso Sud, orientamento preferenziale valido per l'emisfero boreale con inclinazioni variabili da 30° a 40° rispetto all'asse orizzontale; inoltre, le potenze installate e le dimensioni dell'impianto sono generalmente variabili in base alla quota di energia da voler produrre, ma questa condizione contribuisce a dare all'impianto fotovoltaico un aspetto sempre meno uniforme e sempre più distante dalle riflessioni progettuali e compositive².

La netta prevalenza dei sistemi BAPV può essere attribuita al calo del prezzo del fotovoltaico registrato tra il 2008 ed il 2015, dovuto più in generale al calo del costo del silicio, ed al periodo dei *feed-in-tariff* diffusi in Europa intorno al 2010³ con i quali l'energia prodotta poteva essere consumata o venduta sulla base di tariffe incentivanti. L'effetto combinato del calo di prezzi e dei programmi di incentivazione ha condotto, però, verso un uso indiscriminato di impianti fotovoltaici, che al fine di produrre quanta più energia, venivano installati senza attenzione al progetto architettonico.

Da qui, quindi, nasce quella riflessione già introdotta nel capitolo precedente sull'attuale divario tra il progetto di architettura e l'integrazione impiantistica, ricondotta in questo lavoro di tesi all'utilizzo della tecnologia fotovoltaica, e sulla necessità di una visione d'insieme più evoluta che sappia inquadrare il tema dell'integrazione impiantistica in una dinamica complessa, in cui il risultato finale rappresenta il frutto di sforzi congiunti della ricerca, della produzione e della progettazione.



Resa dell'impianto PV in funzione di orientamento ed inclinazione (valido per l'emisfero boreale)

(a destra)

Esempio di impianto fotovoltaico applicato (BAPV)
[http https://unsplash.com/](https://unsplash.com/)

2. Non tutti i sistemi fotovoltaici installati in copertura sono applicati. Per un confronto diretto tra sistemi di copertura BAPV e BIPV si confronti l'immagine di destra con l'immagine immediatamente riportata a seguire, che raffigura *Casa Schneller Bader*, il progetto firmato Be-arth & Deplazes Architekten AG e premiato nel 2017 dal Norman Foster Solar Award

3. Una descrizione più dettagliata dei *feed-in-tariff*, ovvero i piani di incentivazione delle risorse ad energia rinnovabile, viene fornita al paragrafo 2.4 *Evoluzione del BIPV*



Building Integrated Photovoltaics

Una potenziale nuova strada alla condizione appena descritta è l'utilizzo dei sistemi fotovoltaici integrati o *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) che rappresentano una variante al BAPV complessivamente più innovativa. La principale differenza rispetto al fotovoltaico applicato sta proprio nel concetto di integrazione, inteso come l'utilizzo di componenti fotovoltaici che oltre alla produzione di energia rinnovabile, assumono anche il ruolo di componente edilizio. Il primo carattere del BIPV da sottolineare è quindi la multifunzionalità, la condizione secondo la quale i moduli fotovoltaici, invece di essere installati sulle unità tecnologiche, si integrano nell'edificio al posto dei materiali da costruzione tradizionalmente usati per tali unità, e vengono quindi intesi come componenti edilizi adottati come parte integrante dell'involucro edilizio; si rielabora, pertanto, il concetto di involucro edilizio che amplia in tal modo la rosa delle sue funzioni, assumendo anche il ruolo di produzione energetica. Questa sostituzione rappresenta un vantaggio anche in termini di costo di investimento perché un unico componente assolve al tempo stesso due funzioni, benché questo sia un aspetto generalmente omissso nelle critiche mosse nei confronti dei costi maggiori del BIPV.

Come verrà descritto più avanti nel paragrafo 2.4 *Evoluzione del BIPV*, i primi casi di fotovoltaico integrato risalgono al periodo di sperimentazione degli anni Settanta, ma i sistemi BIPV trovano una loro posizione a livello normativo solo nel 2016 con lo standard europeo **EN 50583 Photovoltaics in Buildings**, pubblicato in due parti (EN 50583-1 e EN 50583-2). (EN 50583)

(a destra)
Casa Schneller Bader / Bearth
& Deplazes Architekten AG
Esempio di impianto fotovoltaico integrato (BIPV)
<https://www.subtilitas.site/>



EN 50583 Photovoltaics in Buildings (2016)

Lo standard EN 50583 è l'unico tra gli standard europei a connettere due realtà diverse come quella della costruzione dell'edificio e quella relativa ai sistemi elettrici, motivo per cui il fotovoltaico integrato non deve rispondere solo alle direttive europee relative ai dispositivi energetici, Low Voltage Directive 2006/95/EC, ma anche alla CPR 305/2011⁴ (*European Construction Product Regulation*) e alla EPBD (*European Performance Directive For Buildings*) (Erban 2016)

Definizione di *modulo fotovoltaico integrato* secondo la EN 50583-1:
Photovoltaics in Buildings - Part 1: BIPV modules

photovoltaic modules are considered to be building-integrated, if the PV modules form a construction product providing a function as defined in the European Construction Product Regulation CPR 305/2011. Thus the BIPV module is a prerequisite for the integrity of the building's functionality. If the integrated PV module is dismantled (in the case of structurally bonded modules, dismantling includes the adjacent construction product), the PV module would have to be replaced by an appropriate construction product. (EN 50583)

4. Secondo la CPR 305/2011 un prodotto da costruzione è un "qualsiasi prodotto o kit fabbricato e immesso sul mercato per essere incorporato in modo permanente in opere di costruzione o in parti di esse e la cui prestazione incide sulla prestazione delle opere di costruzione rispetto ai requisiti di base delle opere stesse" (CPR 305/2011)

Delle possibili funzioni, i sistemi BIPV devono garantire una o più tra quelle seguenti (EN 50583), condizione tale da escludere i sistemi BAPV dalla normativa:

- / Rigidezza meccanica o integrità strutturale
- / Protezione primaria contro gli impatti delle intemperie: pioggia, neve, vento, grandine
- / Risparmio energetico, come l'ombreggiamento, l'illuminazione diurna o l'isolamento termico
- / Protezione antincendio
- / Protezione dal rumore
- / Separazione tra ambienti interni ed esterni
- / Sicurezza, rifugio o protezione

Definizione di *sistema fotovoltaico integrato* secondo la EN 50583-2:
Photovoltaics in Buildings - Part 2: BIPV system

BIPV system, photovoltaic systems are considered to be building-integrated, if the PV modules they utilize fulfil the criteria for BIPV modules as defined in EN 50583-1 and thus form a construction product providing a function as defined in the European Construction Product Regulation CPR 305/2011.

Definizione di *sistema fotovoltaico applicato* secondo la EN 50583-2:
Photovoltaics in Buildings - Part 2: BIPV system

BAPV system, photovoltaic systems are considered to be building attached, if the PV modules they utilize do not fulfil the criteria for BIPV modules as defined in EN 50583-1.

Inoltre, la EN 50583-2 specifica i requisiti che i moduli PV devono rispettare per essere considerati *integrati* (distinguendo quei requisiti che tutti i prodotti devono rispettare da quelli specifici di alcuni componenti, come la resistenza al fuoco secondo la EN 13501-1) e suddivide i moduli BIPV in due principali categorie: *contenenti* e *non contenenti* lastre vetrate⁵.

Se la normativa EN 50583 richiede come condizione necessaria quella di multifunzionalità perché il sistema fotovoltaico possa essere considerato integrato, questa integrazione riguarda solo l'aspetto funzionale e costruttivo: perché si possa parlare di BIPV, quindi, è necessario che quel prodotto PV sostituisca un componente edilizio per rispondere ad una o più delle funzioni sopra indicate.

La potenzialità del BIPV, però, risiede anche nella capacità di ridurre quel gap tra progetto di architettura e sistema impiantistico comunemente troppo ampio. La condizione di integrazione funzionale e costruttiva implica infatti una visione progettuale d'insieme in cui il sistema fotovoltaico rientra nella fase iniziale di concept e diventa *materiale* di progetto; questo atteggiamento di attenzione verso una progettazione impiantistica coerente con il progetto di architettura e rispettosa della sua composizione è quella che viene definita dalle principali linee guida come *integrazione formale* (Task 41.A.3/2) (bipv.ch); per rispondere ad esigenze progettuali diverse e per contribuire ad una maggiore integrazione formale, programmi di ricerca internazionali hanno recentemente sviluppato tecnologie innovative capaci di garantire un'ampia gamma di prodotti fotovoltaici disponibili in commercio, differenti in geometrie e colorazioni⁶.

Per ragioni evidenti, la EN 50583 non definisce requisiti specifici volti a garantire l'integrazione formale, se non suggerire un approccio più consapevole e rispettoso del valore del patrimonio costruito.

La normazione dei sistemi fotovoltaici integrati in edilizia e le relative definizioni elaborate in tale standard europeo (EN 50583 *Photovoltaics in buildings* del 2016) lasciano intendere e confermare come il quadro normativo sia sempre più orientato ad assimilare il fotovoltaico all'involucro edilizio verticale.

Tuttavia, i soli concetti di integrazione funzionale e costruttiva dei sistemi BIPV espressi dalla EN 50583 dimostrano l'impossibilità di una normativa di rispondere in maniera esaustiva ed entrare comple-

tamente nel merito di una componente culturale che attiene il progetto di architettura e l'architetto. Ciò vale a dire che, anche attraverso il supporto di tali spinte normative, sarà la figura dell'architetto, ed in alcuni contesti europei meglio definiti più avanti sarà un modello organizzativo basato sulla collaborazione e sulla sinergia di diversi soggetti del processo, ad assumere il ruolo di sperimentatore, al fine di trasferire tali sviluppi tecnologici, quali il concetto di un componente impiantistico integrato, nel mercato delle costruzioni e nella sfera dell'architettura.

*“In Svizzera ho imparato che non devono essere le norme ad imporre le cose. Anche dal basso partono iniziative ed hanno seguito, perché nascono un po' da questa alleanza tra ricerca, industria e progettisti”*⁷ (Bonomo, 2020)

7. Per approfondire si veda la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

5. In merito alle soluzioni contenenti lastre vetrate, la norma EN 50583-2 prevede una classificazione delle categorie di montaggio dalla A alla E che verrà successivamente descritta al paragrafo 2.2 *Forme di integrazione e possibili interpretazioni*

6. Un approfondimento delle tecnologie di colorazione dei moduli fotovoltaici è presentato al paragrafo 2.6.3 *Approfondimento. Caratteristiche formali*

2.2 FORME DI INTEGRAZIONE E POSSIBILI INTERPRETAZIONI

È stato già evidenziato come il *Building Integrated Photovoltaics* implichi una nuova logica di pensiero orientata ad una differente interpretazione dell'involucro edilizio: la rosa delle funzioni che l'involucro edilizio deve garantire si amplia, così come si evolve l'interpretazione dell'architettura quale organismo capace di inserirsi in un sistema energetico bidirezionale¹. A questo proposito, quindi, il paragrafo in esame si sofferma sulle possibili integrazioni del sistema fotovoltaico come componente edilizio per l'involucro verticale, al fine di predisporre una base di riferimento per l'elaborazione di successive riflessioni.

Verrà quindi analizzata la EN 50583 in merito alla classificazione fornita rispetto al tipo di installazione PV, così come si ricorrerà allo standard italiano UNI 8290-1:1981 in riferimento alla ripartizione tecnologica dell'involucro edilizio per individuare i componenti edilizi e le rispettive funzioni che i sistemi PV integrati possono assolvere. Ulteriori criteri di classificazione delle soluzioni BIPV sono stati analizzati per giungere ad una propria interpretazione, che nel corso del lavoro di tesi vedrà delinearci con il concetto di *forme di integrazione* e successivamente di *strategie di integrazione*.

1. Si consulti la figura 3 del paragrafo 1.5 *Il futuro delle energie rinnovabili*

Standard europei e standard nazionali

La letteratura del BIPV è ricca di criteri per la definizione dei sistemi BIPV, a partire dalla stessa EN 50583-2 che fornisce una prima classificazione del tipo di installazione in merito ai moduli PV contenenti lastre vetrate²; sono stabilite cinque categorie di montaggio definite in base ai componenti sostituiti, (elementi di copertura, di chiusura verticale ed elementi esterni all'involucro) e distinte in base all'accessibilità o meno dell'impianto PV dall'interno dell'edificio.

figura 1

A questo proposito, con riferimento alla ripartizione tecnologica presentata dallo standard italiano UNI 8290-1:1981 *Edilizia residenziale. Sistema Tecnologico. Classificazione e terminologia*, i moduli fotovoltaici integrati potrebbero sostituire gli elementi tecnici (o componenti edilizi) delle seguenti classi di elementi tecnici (UNI 8290):

Classi di unità tecnologiche	Unità tecnologiche	Classi di elementi tecnici
Chiusura	Chiusura verticale	Pareti perimetrali verticali Infissi esterni verticali
	Chiusura superiore	Coperture Infissi esterni orizzontali
Partizione esterna	Partizione esterna verticale	Elementi di protezione Elementi di separazione
	Partizione esterna orizzontale	Elementi di protezione superiore

2. La EN 50583-2 distingue i moduli BIPV che contengono almeno una lastra di vetro da quelli che non ne contengono alcuna. In aggiunta ai requisiti comune ad entrambe le categorie, tale standard classifica i moduli contenenti lastre vetrate in cinque categorie dipendenti dal tipo di montaggio previsto (EN 50583)

Un **elemento tecnico** è un componente edilizio capace di svolgere funzioni proprie di una o più unità tecnologiche. Nella UNI gli elementi tecnici sono raggruppati secondo un criterio funzionale in classi di elementi tecnici. Nella tabella a sinistra vengono riportate le classi di elementi tecnici dello standard italiano idonee all'integrazione BIPV.



Categoria A

Copertura inclinata integrata (non accessibile dall'interno dell'edificio)

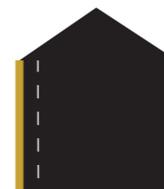
I moduli PV sono montati nell'involucro dell'edificio con un angolo tra 0° e 75° con una barriera sottostante che impedisce la caduta di grandi pezzi di vetro sulle aree accessibili sottostanti.



Categoria B

Copertura inclinata integrata (accessibile dall'interno dell'edificio)

I moduli PV sono montati nell'involucro dell'edificio con un angolo tra 0° e 75°.



Categoria C

Installazione verticale, non inclinata (non accessibile dall'interno dell'edificio)

I moduli PV sono montati nell'involucro dell'edificio con un angolo compreso tra 75° e 90° con una barriera dietro che impedisce la caduta di grandi pezzi di vetro o di persone in un'area adiacente più bassa all'interno dell'edificio.



Categoria D

Installazione verticale, non inclinata (accessibile dall'interno dell'edificio)

I moduli PV sono montati nell'involucro dell'edificio con un angolo compreso tra 75° e 90°.



Categoria D

Installazione esterna all'involucro (accessibile o non accessibile dall'interno dell'edificio)

I moduli PV sono montati sull'edificio e formano un ulteriore strato funzionale al suo involucro (ad esempio balconi, balaustre, serrande, tende da sole, persiane, brise soleil, ecc.).

figura 1

Categorie di montaggio come definite nella EN 50583-2 "Photovoltaics in Buildings - Part 2: BIPV system"

Per *non accessibile* si intende che un altro prodotto di costruzione fornisce protezione contro l'impatto meccanico, anche quando il modulo PV è stato danneggiato o rimosso. Per *non inclinato* si intende un angolo compreso tra $75^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ oppure tra $90^\circ \leq \alpha \leq 105^\circ$ rispetto l'orizzontale (fonte: EN 50583; rielaborazione grafica)

La classificazione del BIPV nelle sole cinque categorie di montaggio fornite dalla EN 50583-2 non è però sufficiente a fornire una completa lettura dei sistemi BIPV disponibili in commercio e della rispettiva modalità di integrazione, perché circoscritta ad una suddivisione del sistema edilizio in elementi di chiusura superiori, elementi di chiusura verticali e componenti edilizi esterni all'involucro³ (ripartizione tecnologica del sistema edilizio comparabile con la UNI 8290-1:1981 *Edilizia residenziale. Sistema Tecnologico. Classificazione e terminologia* o la ISO 6241:1984 *Design of Building System – Building System and Performance Approach*)

3. Le classi di componenti edilizi non esposte ai raggi solari (come quelle strutturali o quelle volte alla partizione interna degli ambienti interni) vengono chiaramente escluse dalla trattazione

figura 2
Distribuzione dei prodotti BIPV secondo le diverse categorie (risultati di indagine di mercato)
(fonte: PVPS T15-07 2019; rielaborazione grafica)

Altre classificazioni

Al fine di fornire una panoramica più ampia dei sistemi integrati, le attività di ricerca sul BIPV e le linee guida presenti nella letteratura adottano diversi criteri di classificazione, da quelli funzionali a quelli tecnologici.

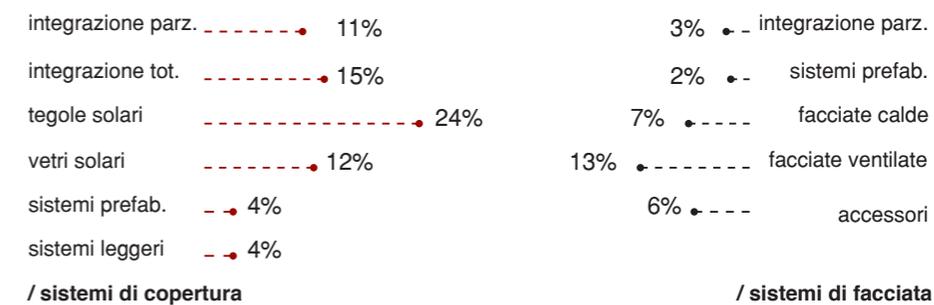
Nella pubblicazione *Building Integrated Photovoltaics: Product overview for solar buildings skins. Status Report 2017* (SUPSI 2017) Zanetti I. *et al.* classificano prima i sistemi BIPV nelle principali categorie di copertura e facciata, per poi distinguere le soluzioni integrate in base al **sistema tecnologico** adottato **figura 2**:

per l'integrazione in **copertura**

- / integrazione parziale
- / integrazione totale
- / tegole solari
- / vetri solari
- / sistemi prefabbricati
- / sistemi leggeri (tecnologia PV a film sottile)

per l'integrazione in **facciata**

- / facciate calde
- / facciate ventilate
- / sistemi prefabbricati
- / sistemi leggeri (tecnologia PV a film sottile)
- / accessori (es. balconi, parapetti, sistemi di schermatura solare)



Un criterio analogo di classificazione dei sistemi BIPV basato sulla **funzione** e sulla **tecnologia** delle soluzioni è stato adottato nel 2011 nel progetto SUNRISE *Building Integrated Photovoltaics: An overview of the existing products and their fields of applications* (Montoro *et al.* 2011) e distingue le soluzioni BIPV in cinque categorie con le relative applicazioni:

- / sistemi standard di copertura
- / sistemi semitrasparenti
- / sistemi di rivestimento
- / tegole e scandole solari
- / laminati flessibili (tecnologia PV a film sottile)

È chiaro quindi come **l'integrazione del PV possa avvenire su tutti i componenti edilizi esposti alla radiazione solare**, diversamente da quanto avviene per i sistemi fotovoltaici applicati in copertura (BAPV) e **come la facciata e gli altri componenti edilizi che questa ospita** (es. elementi di protezione, elementi di partizione, schermature solari) rappresentino aree altrettanto interessanti per l'integrazione del fotovoltaico, sebbene l'angolo di tilt delle superfici verticali non sia quello ottimale per massimizzare la produzione energetica⁴.

L'interesse specifico per l'integrazione del PV in facciata è riportato nella tesi di dottorato di Angela Cluas Longas in Architettura e Scienze Urbane presso l'École Polytechnique Fédérale de Lausanna (EPFL) *Designing Energy-Efficient Façades to Meet Energy Transition Targets* (Clua Longas 2019) in cui le caratteristiche del BIPV in merito all'integrazione architettonica vengono classificate in due categorie diverse ma dipendenti l'una dall'altra, le **caratteristiche visive** e quelle **funzionali**.

Le caratteristiche visive sono successivamente distinte in:

- / soluzioni opache
- / soluzioni traslucide
- / soluzioni trasparenti

Quelle funzionali sono distinte in:

- / elementi di rivestimento
- / elementi di protezione solare
- / elementi di sicurezza
- / elementi vetrati

4. Le potenzialità dell'integrazione PV in facciata verranno esposte nel paragrafo 2.3 *Cosa hanno da offrire le facciate*

Possibili interpretazioni

Le potenzialità dell'integrazione fotovoltaica in facciata documentate nel presente lavoro di tesi hanno stimolato la ricerca ad investigare in maniera più approfondita i sistemi BIPV di facciata e ad avanzarne una fase di indagine sullo stato dell'arte.

L'esito della ricerca è il frutto dell'analisi di un mercato, quello del PV integrato in edilizia, ancora in corso di sviluppo e lo scopo del lavoro di tesi, pertanto, è quello di individuarne potenziali fattori di innovazione.

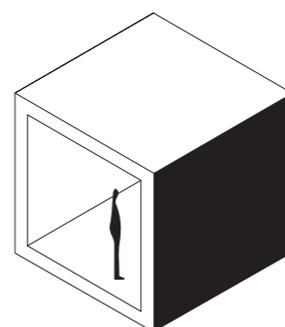
Sulla base delle precedenti operazioni di classificazione, la ricerca ha portato ad individuare un primo modello basato sul criterio funzionale secondo il quale vengono distinte quattro categorie in base alla rispettiva funzione: definite come *forme di integrazione*, la classificazione BIPV si distingue in elementi di chiusura verticale opaca, elementi di chiusura verticale trasparente, elementi di schermatura solare ed elementi di protezione.

A seguito di questa prima distinzione, un approfondimento sul BIPV integrato come elemento di chiusura verticale opaca (forma di integrazione in facciata più comune) permette di evidenziare una seconda classificazione basata questa volta sul sistema costruttivo; vale a dire, vengono distinti i principali sistemi costruttivi adottati nello stato dell'arte BIPV per l'integrazione del PV come componente di facciata opaco: sistemi di rivestimento con sottostruttura metallica per pareti ventilate e sistemi di rivestimento con componenti prefabbricati.

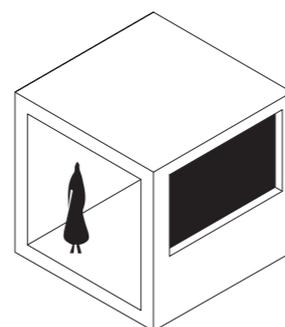
Forme di integrazione

Con riferimento alla UNI 8290-1:1981, per chiusura verticale si intende l'unità tecnologica che separa verticalmente l'interno dell'edificio dall'esterno e che deve rispettare una serie di requisiti (es. isolamento termico, acustico, impermeabilità all'acqua e all'aria ecc.), validi sia per la chiusura opaca che per quella trasparente. (Campioli, Lavagna, 2013) Per rispettarli, le **chiusure verticali opache** possono essere scomposte in strati a cui è attribuibile una o più funzioni: tra queste, le soluzioni BIPV integrate generalmente assumono come funzione supplementare quella di strato di rivestimento esterno.

Le **chiusure verticali trasparenti** devono garantire le stesse prestazioni di quelle opache (quando chiusi), ma devono permettere al contempo il passaggio della radiazione solare e sono quindi caratterizzate dalla trasparenza. (Campioli, Lavagna, 2013) Per soddisfare il comfort termico e visivo, l'integrazione del PV nei componenti vetrati avviene garantendo una certa distanza tra le celle PV quando la tecnologia fotovoltaica adottata è mono o policristallina oppure tramite trattamenti laser sullo strato attivo per il fotovoltaico a film sottile. (PVPS T15-07 2019)



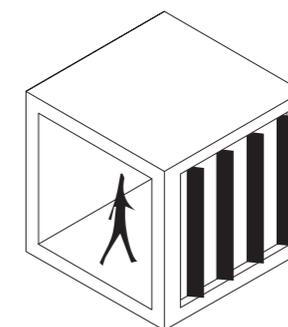
1
Elemento di chiusura
verticale opaco



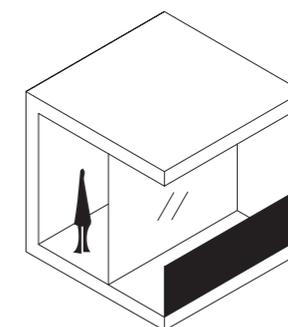
2
Elemento di chiusura
verticale trasparente

Le **schermature solari** sono componenti edilizi esterni alle superfici trasparenti e necessari per regolare l'ingresso della radiazione solare: impediscono il surriscaldamento estivo, garantiscono il guadagno solare invernale, evitano fenomeni di abbagliamento. Gli schermi possono essere fissi e mobili ed il tipo di orientamento ed inclinazione varia in relazione all'esposizione della facciata (la rappresentazione grafica è quindi di tipo solo indicativo e non include tutte le tipologie esistenti). Data la prolungata esposizione alla radiazione solare come elementi di protezione, le schermature solari si prestano all'integrazione fotovoltaica la quale può avvenire con la semplice sostituzione degli elementi schermanti con soluzioni BIPV progettate *ad hoc* per questa funzione.

Gli **elementi di protezione** individuati nella ricerca sono i componenti edilizi verticali per l'articolazione dello spazio esterno connesso al sistema edilizio ed hanno la funzione di protezione dalla caduta di persone e oggetti (es. i parapetti dei balconi e delle logge). Gli elementi di protezione possono essere di vario tipo, composti da elementi puntuali collocati ad un passo costante oppure costituiti da pannelli montati in serie. Come elementi esterni esposti alla radiazione solare, anche gli elementi di protezione possono essere sostituiti con componenti BIPV installati con la duplice funzione di protezione.



3
Elemento di
schermatura solare



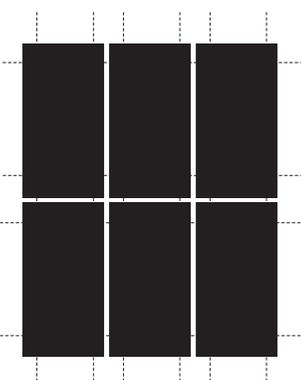
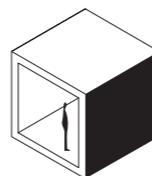
4
Elemento di
protezione

(Elaborazione propria)

Sistema costruttivo

(per sistemi BIPV come elementi di chiusura verticale opaca)

Elemento di chiusura verticale opaco



Sistema di rivestimento con pannelli PV e sottostruttura

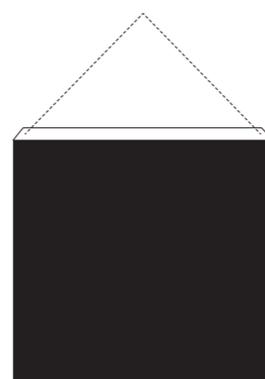
Per le chiusure verticali opache BIPV la facciata ventilata rappresenta il sistema tecnologico più diffuso.

I moduli fotovoltaici sostituiscono i tradizionali elementi di rivestimento e vengono agganciati alla sottostruttura metallica a sua volta ancorata alla parete perimetrale. Nell'intercapedine d'aria tra la parete ed il rivestimento si generano moti convettivi dell'aria dal basso verso l'alto che in estate favoriscono la riduzione di calore accumulato per irraggiamento solare. (Campioli, Lavagna, 2013) Poiché uno dei fattori di deterioramento dei moduli PV a celle cristalline sono le alte temperature di operazione, tale sistema costruttivo migliora le prestazioni dei moduli fotovoltaici.

Sistema di rivestimento con componenti prefabbricati

I sistemi BIPV con componenti prefabbricati risultano meno comuni delle facciate ventilate, seppur godano di un alto potenziale innovativo.

Un sistema BIPV con componenti prefabbricati include il sistema di fissaggio alla parete e generalmente fornisce ulteriori funzioni oltre le caratteristiche di multifunzionalità del BIPV (che in questo caso sono la chiusura verticale opaca e la produzione energetica). È un prodotto preassemblato che facilita le fasi di montaggio e sostituzione secondo il concetto *plug&play*. L'elemento attivo fa quindi parte di un sistema.



(Elaborazione propria)

2.3

COSA HANNO DA OFFRIRE LE FACCIATE

La EN 50583-2 *Photovoltaics in Buildings – Part 2: BIPV system* classifica i sistemi fotovoltaici integrati in installazioni su coperture inclinate, installazioni verticali ed installazioni esterne, di cui le due principali aree di interesse rappresentano le coperture e le facciate. (SUSPI 2017). Si considerano coperture le superfici con inclinazione compresa tra 0° e 60° e facciate quelle con inclinazione tra 60° e 90°. Ciò nonostante, poiché alle latitudini dei Paesi centroeuropei la massima produzione energetica si ottiene con moduli fotovoltaici inclinati di circa 35° (**angolo di tilt**) ed orientati verso Sud (**angolo azimutale**), la morfologia stessa delle coperture inclinate rivolte a Sud ha rappresentato la scelta più diffusa per l'integrazione fotovoltaica, con la conseguente quota del 46,6% di prodotti BIPV disponibili per coperture contro l'11% di quelli disponibili per facciate; la restante quota è relativa a prodotti per arredo urbano e componenti BIPV customizzati. (Scognamiglio 2017)

L'interesse riposto in questo lavoro di tesi verso l'integrazione fotovoltaica in facciata risiede però nelle potenzialità che quest'ultima può offrire, motivo per cui lo scopo del paragrafo è quello di delineare una più ampia panoramica dei vantaggi di cui godono le facciate fotovoltaiche. Inoltre, la recente tendenza alla rapida diminuzione dei costi del fotovoltaico che dovrebbe proseguire anche negli anni futuri rappresenta un'opportunità per questo tipo di applicazioni. (Brito *et al.* 2017)

In prima battuta si pone il tema dell'autoconsumo dell'edificio. “*Dal punto di vista energetico, il vero driver del fotovoltaico integrato è quello di rendere l'edificio il più possibile autosufficiente, di produrre energia in maniera decentralizzata e di aumentare l'autoconsumo.*”¹ (Bonomo, 2020) L'attuale sfida energetica e gli obiettivi di decarbonizzazione imposti dall'Unione Europea impongono un uso più consolidato delle risorse rinnovabili per gli edifici, con particolare attenzione alla produzione energetica locale che riduce le perdite

1. Pierluigi Bonomo è un ricercatore italiano attualmente attivo presso il centro di ricerca svizzero ISAAC della SUPSI. Per approfondire si veda la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

energetiche dovute al trasporto². Rendere il più possibile autosufficiente un edificio vuol dire ridurre l'approvvigionamento energetico dalla rete di distribuzione, per coprire quanto possibile la domanda energetica con energia prodotta in modo autonomo.

Considerando un edificio residenziale di cui viene momentaneamente trascurata la posizione geografica, è possibile affermare che generalmente la domanda energetica intorno a mezzogiorno è ridotta rispetto quella delle ore serali, mentre l'intensità della radiazione solare, e quindi della produzione fotovoltaica, a mezzogiorno è massima quando l'impianto è installato secondo l'orientamento preferenziale (PV orientato a Sud ed inclinato di 30°-35°) (Freitas, Brito 2019). Il grafico in **figura 1** mostra questo sfasamento temporale tra la curva della domanda e quella dell'offerta, per cui una quota di energia prodotta dall'edificio non può essere utilizzata istantaneamente e, in assenza di sistemi di stoccaggio connessi all'impianto dell'edificio, va immessa nella rete elettrica. Per ridurre quanto più possibile questo gap, orientamenti diversi da quello Sud, per cui le esposizioni ad Est ed Ovest, contribuiscono ad ottenere una produzione energetica giornaliera più uniforme, in quanto forniscono una massima produzione rispettivamente durante le ore mattutine e pomeridiane, quando c'è maggiore richiesta. (Freitas, Brito 2019) (Sánchez, Izard, 2015)

Tale strategia permetterebbe di ridurre il flusso di energia scambiato tra la rete elettrica e l'edificio per aumentarne l'autoconsumo. **figura 2** Inoltre, durante i mesi invernali quando l'altezza solare è bassa ed i raggi solari sono più radenti all'orizzonte, le superfici verticali esposte alla radiazione solare producono maggiore energia delle coperture.

Altro tema fondamentale connesso a quello dell'autoconsumo è l'attuale sfida di transizione energetica. *“Per i target che ci siamo dati al 2030 ed al 2050 con il Green Deal abbiamo assolutamente bisogno di fotovoltaico sugli edifici ed in tutte le infrastrutture. Serve aumentare l'installato di PV a livelli drammatici, se vogliamo davvero decarbonizzare la nostra economia. Quindi, dove si posiziona tutto questo fotovoltaico senza andare a utilizzare massivamente i terreni agricoli o forestali? Diventa fondamentale installare più PV possibile negli edifici.”*³ (Virtuani, 2021)

Per rispettare i target stabiliti serve aumentare la potenza fotovoltaica installata, per cui in questa traiettoria le facciate fotovoltaiche non devono essere necessariamente viste come sostituzione delle coperture

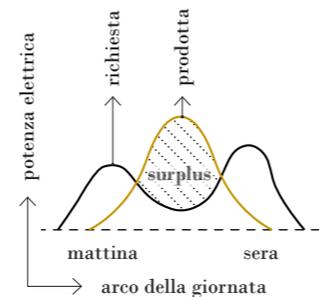


figura 1
Curva del rapporto domanda-offerta dell'energia elettrica nell'arco della giornata

2. Per approfondire il tema della transizione energetica e l'uso delle risorse rinnovabili in ambiente costruito si veda il capitolo 1 *Transizione energetica e architettura*

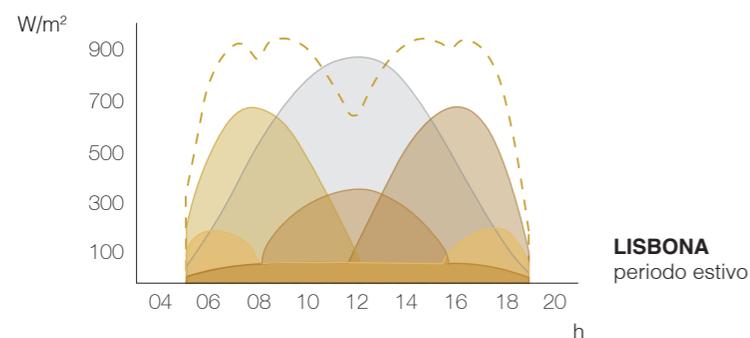
3. Alessandro Virtuani è ricercatore senior e responsabile del gruppo Moduli e Affidabilità presso l'EPFL e socio fondatore di *Officina del Sole*, start-up di Milano. Per approfondire si veda la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

ture fotovoltaiche, piuttosto rappresentano uno strumento integrativo e di supporto. Inoltre, a seguito dell'intenso processo di urbanizzazione e densificazione dei centri urbani, le sole coperture possono non essere più sufficienti per coprire il fabbisogno energetico degli edifici residenziali multipiano. In questo caso le facciate godono di superfici esposte alla radiazione solare che potenzialmente sono più estese di quelle offerte dalle coperture⁴. (PVPS T15-07 2019)

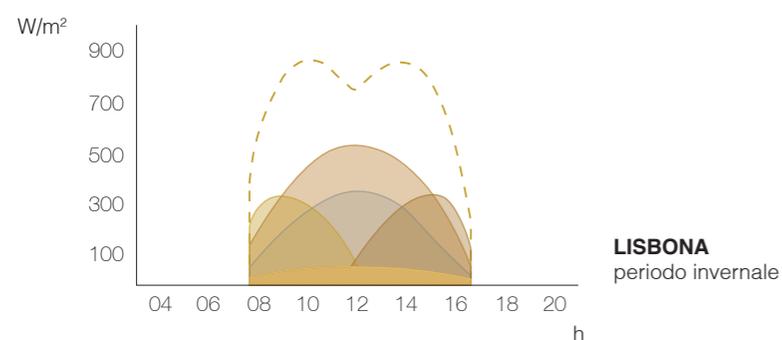
Per quanto riguarda l'aspetto economico, i materiali di rivestimento delle facciate sono generalmente più costosi di quelli utilizzati per la copertura (SUPSI 2017) per cui nel caso dell'integrazione in facciata si assisterebbe alla sostituzione di un materiale costoso con un altro materiale costoso (facciata) con il valore aggiunto di produzione energetica, mentre nel caso di integrazione in copertura si sostituirebbe un materiale economico con un materiale costoso, seppur abbia come valore aggiunto la produzione energetica. (Tendenzialmente tegole e lamiere tradizionali non superano i 100€/m² (inclusi i costi di montaggio, trasporto ed altri costi addizionali) contro i 200-400€/m² dei prodotti BIPV per coperture, mentre alcuni materiali di rivestimento tradizionali come il *curtain wall* o elementi in pietra di elevata qualità possono raggiungere i 1200€/m² nel primo caso (inclusi i costi del sistema totale, di montaggio e delle schermature solari) ed i 600€/m² caso (esclusi i costi di sottostruttura, fissaggio ed isolamento termico) contro i 500€/m² dei prodotti BIPV di facciata) (SUPSI 2017)

Un ultimo aspetto da non sottovalutare è rappresentato dal maggiore impatto sociale ed accettazione del fotovoltaico che una facciata fotovoltaica può suscitare rispetto ad una copertura fotovoltaica, quando il progettista riesce ad integrare il PV nel proprio concept progettuale. Ancora una volta, quindi, va sottolineata l'importanza del progetto di architettura, che al tempo stesso si avvalora e contribuisce in maniera positiva alla trasformazione delle città.

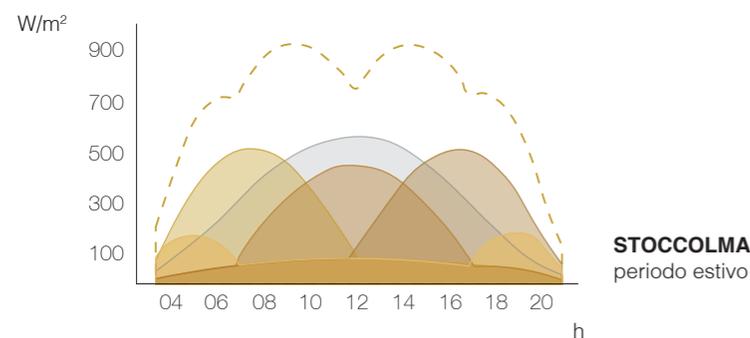
4. Rispetto alle coperture generalmente prive di ostruzioni, la produzione energetica delle facciate può essere compromessa dalla presenza di vincoli urbani ed edilizi che causano ombreggiamento, motivo per cui le facciate BIPV rappresentano aree "potenzialmente" vantaggiose solo a patto di un'attenta analisi e progettazione



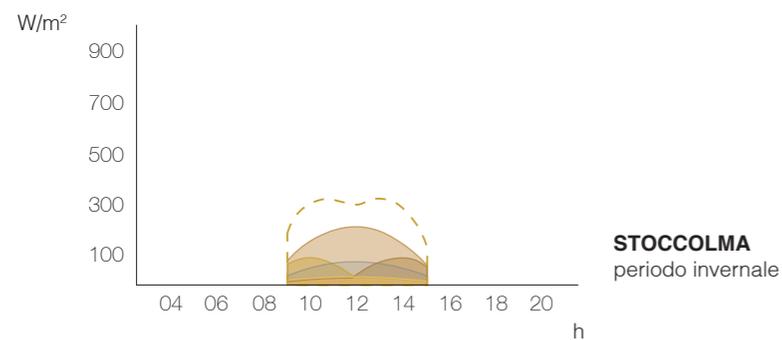
LISBONA
periodo estivo



LISBONA
periodo invernale



STOCCOLMA
periodo estivo



STOCCOLMA
periodo invernale

figura 2
Distribuzione giornaliera dell'irraggiamento solare medio per piani verticali ed orizzontali.

Vengono confrontati i valori giornalieri dell'irraggiamento solare medio per (I) differenti località geografiche (II) differenti periodi dell'anno (III) differenti esposizioni ed inclinazioni. (fonte: Freitas, Brito 2019; rielaborazione grafica)

(I) Località geografiche

LISBONA
38°43'56"N

STOCCOLMA
59°20'6"N

(III) Esposizioni ed inclinazioni

- p. verticale / Sud
- p. verticale / Est
- p. verticale / Ovest
- p. verticale / Nord
- p. orizzontale
- p. verticale / totale

2.4 EVOLUZIONE DEL BIPV

Sebbene il BIPV non abbia ancora raggiunto una significativa diffusione e rimanga un mercato di nicchia¹, la tecnologia fotovoltaica integrata ha una storia ben più lunga di quelle che sono le principali ricerche in atto e affonda le sue radici nei primi anni Settanta. Le attuali possibilità di adottare soluzioni BIPV mimetiche per facilitarne la maggiore integrazione nel progetto di architettura sono infatti il risultato di un articolato percorso evolutivo seguito per circa cinquanta anni.

Nel recente lavoro pubblicato dalla Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI) *Building Integrated Photovoltaics: a practical handbook for solar buildings* (SUPSI 2020) la "I" di BIPV viene intesa nel duplice significato di *integration* e *innovation* per sottolinearne il concetto di innovazione che vi è alla base: la visione del sistema fotovoltaico non più solo come uno strumento necessario alla produzione energetica ma, da un lato, la capacità del progetto di architettura di interpretare il tema dell'integrazione fotovoltaica in una visione olistica che rielabora il concetto di involucro e, dall'altro, l'importanza della catena del valore del BIPV che, per la sua natura di componente al tempo stesso impiantistico e costruttivo, implica un modello organizzativo innovativo e complesso all'interno del quale gli operatori di tale processo appartengono a sfere di competenza differenti.

In questo paragrafo l'innovazione tecnologica viene riconosciuta nel suo *appeal* e l'obiettivo è quello di ripercorrerne il percorso evolutivo che ha condotto ai risultati attuali, inquadrando le tappe principali come le cause o le conseguenze dei rispettivi contesti storici.

1. Come indicato al paragrafo 2.1 *Un nuovo componente edilizio*, la dimensione attuale del mercato BIPV è solo l'1% del mercato fotovoltaico globale

Punto di partenza

La scoperta dell'effetto fotovoltaico

La storia del fotovoltaico inizia nella prima metà dell'Ottocento, quando nel 1839 Alexandre-Edmond Becquerel, durante alcuni esperimenti in laboratorio col padre, si accorse di una differenza di potenziale che si creava tra due elettrodi di un voltmetro quando uno di questi veniva illuminato; (Zampino 2013) successivamente, durante la posa in opera di un cavo telegrafico transatlantico nel 1867, l'elettricista capo del progetto Willoughby Smith inventò un congegno a base di selenio per l'individuazione di eventuali difetti dei cavi e si accorse di come le barre di selenio utilizzate producessero piccole quantità di energia durante il giorno. I successivi esperimenti dei ricercatori William Grylls Adams e Richard Evans Day dimostrarono la correttezza di quel fenomeno e la corrente elettrica generata dalla luce venne inizialmente chiamata "fotoelettrica" (solo a partire dagli anni Venti gli scienziati adottarono il termine "effetto fotovoltaico"); nel 1885 il primo pannello fotovoltaico a base di selenio venne realizzato dall'americano Charles Fritts. (Perlin 2000)

Per le celle di silicio tipiche dei pannelli fotovoltaici bisogna attendere il 1953, quando nel tentativo di risolvere alcuni problemi relativi al sistema telefonico della compagnia *Bell*, i tre ricercatori Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson idearono la prima cella solare al silicio. (Perlin 2004). **figura 1**

Nonostante l'invenzione di tale cella solare al silicio denominata "Batteria Solare Bell" avesse suscitato l'attenzione della stampa e l'entusiasmo del pubblico, i costi elevati di questa tecnologia rispetto a quelli dei combustibili fossili non ne permisero il trasferimento nel mercato, e le prime applicazioni di fotovoltaico, quindi, riguardarono quei contesti dove non era possibile il collegamento alla rete elettrica. (Perlin 2000)



figura 1 (a destra)
Daryl Chapin, Calvin Fuller
e Gerald Pearson della compagnia Bell ideano la prima cella al silicio nel 1953
(fonte: Perlin 2004)

Prime applicazioni nello spazio

Un possibile ma inaspettato mercato è emerso quando il satellite Vanguard I lanciato nel 1958 utilizzava celle solari come fonte di energia; a causa della necessità di produrre energia in luoghi inaccessibili dalla rete elettrica, le esplorazioni spaziali divennero il primo mercato significativo per il fotovoltaico, dando inizio a quella che Jacobsson S., Bangens L. e Sandén B. definivano come *Space Age* nella loro ricostruzione della storia delle celle fotovoltaiche. (Jacobsson, Sandén, Bangens 2004)

Il primo mercato ad uso terrestre

Se durante gli anni Sessanta e Settanta si consolidava l'uso dell'energia fotovoltaica nello spazio, sulla Terra questa stessa tecnologia risultava ancora troppo costosa e, pertanto, remota. Il primo acquirente di celle solari per uso terrestre fu l'industria petrolifera, quando negli anni Settanta il governo degli Stati Uniti impose l'installazione di luci di segnalazione sulle piattaforme petrolifere nel Golfo del Messico; altre applicazioni ci furono invece nei campi di estrazione del petrolio e del metano (Perlin 2000).

L'elettificazione dei luoghi remoti

In questa stessa logica, anche le prime applicazioni sugli edifici, che invece risalgono agli anni Settanta, riguardavano aree remote e difficilmente accessibili da una rete elettrica, dove moduli fotovoltaici dai telai in alluminio venivano collegati agli edifici o applicati sui loro tetti. Le zone rurali dei paesi in via di sviluppo, a causa dei costi troppo elevati per la realizzazione di una rete elettrica estesa ad aree remote e connessa alla centrale elettrica, hanno rappresentato i primi esempi di applicazione di sistemi energetici autosufficienti per le abitazioni.

L'idea di dotare i villaggi dei paesi in via di sviluppo di sistemi fotovoltaici per l'autosostentamento si concretizzò nel 1977, quando un esperto delle Nazioni Unite propose di installare diecimila impianti fotovoltaici da 50 chilowatt per soddisfare il fabbisogno energetico elettrico di diecimila villaggi da cento famiglie l'uno. Sebbene questo rappresentasse il primo tentativo per migliorare la qualità della vita per i paesi in via di sviluppo, il concetto di costruire una mini-centrale fotovoltaica in prossimità dei villaggi alla quale agganciare tutte le abitazioni tramite cavi elettrici non risultò vincente, come dimostrato dalla vicenda di un villaggio nell'isola di Utirik, nel Sud Pacifico.

L'aggancio di ogni unità abitativa del villaggio alla stessa centrale elettrica fece sì che ogni famiglia, non sentendosi direttamente responsabile dell'impianto, cercasse di usufruire di quanta più elettricità possibile dal sistema fotovoltaico (per esempio utilizzando elettrodomestici di grandi dimensioni e tenendo le luci accese durante la notte) e causando una domanda energetica tale da mandare continuamente in tilt la centrale fotovoltaica. L'ingegnere Jim Martz della NASA concluse quindi che l'unico modo per far funzionare il sistema fotovoltaico fosse la presenza di un addetto alla sorveglianza. (Perlin 2000).

Un caso più virtuoso che adottava impianti fotovoltaici per singole abitazioni può essere riconosciuto nell'adozione di sistemi PV per le isole e gli atolli polinesiani nel 1978, su decisione del Commissariato per l'Energia Atomica francese. Nonostante il programma francese fosse stato avviato per riconquistare l'opinione pubblica del popolo polinesiano dopo i test nucleari effettuati in Polinesia, fin dal 1983 metà delle famiglie delle isole della Polinesia francese sfrutta l'energia fotovoltaica. Sempre nell'83, quasi il 20% della produzione mondiale di celle solari era installata sui tetti della Polinesia francese. Oltre gli impianti PV, la società G.I.E. Soler fabbricava e forniva elettrodomestici ad alta efficienza energetica, al fine di ridurre il consumo energetico e, di conseguenza, il numero di moduli fotovoltaici necessari per ciascuna abitazione. Nell'87 metà degli impianti fotovoltaici installati nelle isole e negli atolli polinesiani fu acquistato dai proprietari delle case, mentre l'altra metà fu installata a titolo gratuito sulle abitazioni dei cittadini più poveri, a patto che questi versassero un canone mensile al sindaco del villaggio per rimborsare l'acquisto dei moduli dalla G.I.E Soler. Sebbene, però, il rifiuto da parte dei cittadini di saldare tale debito ha decretato un parziale insuccesso del progetto, l'esperienza polinesiana ha dimostrato da un lato le potenzialità dei sistemi diffusi che, a differenza delle grandi centrali elettriche, non sono soggetti a perdite di efficienza dovute a questioni legate al trasporto e alla manutenzione, e dall'altro l'importanza della riduzione dei consumi energetici attraverso l'utilizzo di elettrodomestici a basso consumo. (Perlin 2000)

Il fotovoltaico raggiunge i luoghi già elettrificati

Solo dagli anni Ottanta, però, l'adozione dei sistemi fotovoltaici applicati si diffuse anche nelle aree collegate ad una rete elettrica (Eiffert, Kiss, 2000) dando avvio a quella che oggi è la consueta pratica

di applicazione del fotovoltaico in copertura, definita in questo lavoro di tesi come *Building Applied Photovoltaics* (BAPV). Tra gli esempi significativi delle prime applicazioni di fotovoltaico sugli edifici va ricordato il progetto *Megawatt* lanciato nel 1986 dall'ingegnere svizzero Markus Real chiamando alla partecipazione 333 proprietari di abitazioni: l'iniziativa prevedeva la distribuzione della potenza di una centrale elettrica da 1 MW su 333 tetti con esposizione ottimale, con l'applicazione per ogni tetto di 3 Kw prodotti da pannelli fotovoltaici. Alla scelta di produrre elevate quantità di energia con vaste concentrazioni di pannelli fotovoltaici, il fine del progetto era dimostrare i vantaggi di un sistema energetico decentralizzato, un concetto oggi completamente attuale e già intuito nel 1978, durante il programma francese per le isole polinesiane. La necessità di comprare un vasto terreno, di realizzare costose reti di collegamento, di acquistare un grande invertitore elettrico, di costruire un fabbricato per collocare l'invertitore sono solo alcune delle spese aggiuntive che Real descrive in riferimento alla costruzione di una centrale fotovoltaica, in aggiunta ai danni ambientali che tale costruzione può arrecare. (Perlin 2000)

La diffusione delle prime soluzioni fotovoltaiche in ambiente costruito combaciò anche con la prima crisi petrolifera del '73, quando l'Europa e gli Stati Uniti videro il rincaro dei prezzi del petrolio dovuto alla guerra dello Yom Kippur con la conseguente consapevolezza della limitatezza delle risorse energetiche e della riduzione dei consumi energetici; furono gli anni in cui si diffuse la sensibilizzazione verso l'ambiente circostante ed il crescente interesse verso le celle fotovoltaiche. Come risposta allo shock petrolifero, nel 1974 nacque l'*International Energy Agency* IEA con l'obiettivo di garantire dei meccanismi di azione collettiva per rispondere a potenziali interruzioni dell'approvvigionamento di petrolio; nel corso degli anni la IEA si è evoluta ed oggi è al centro del dibattito globale sulla transizione energetica.

(a seguire)

Ricostruzione dell'evoluzione storica del BIPV

Il grafico riportato nelle pagine seguenti vuole fornire una lettura incrociata del processo evolutivo che ha caratterizzato il *Building Integrated Photovoltaics*.

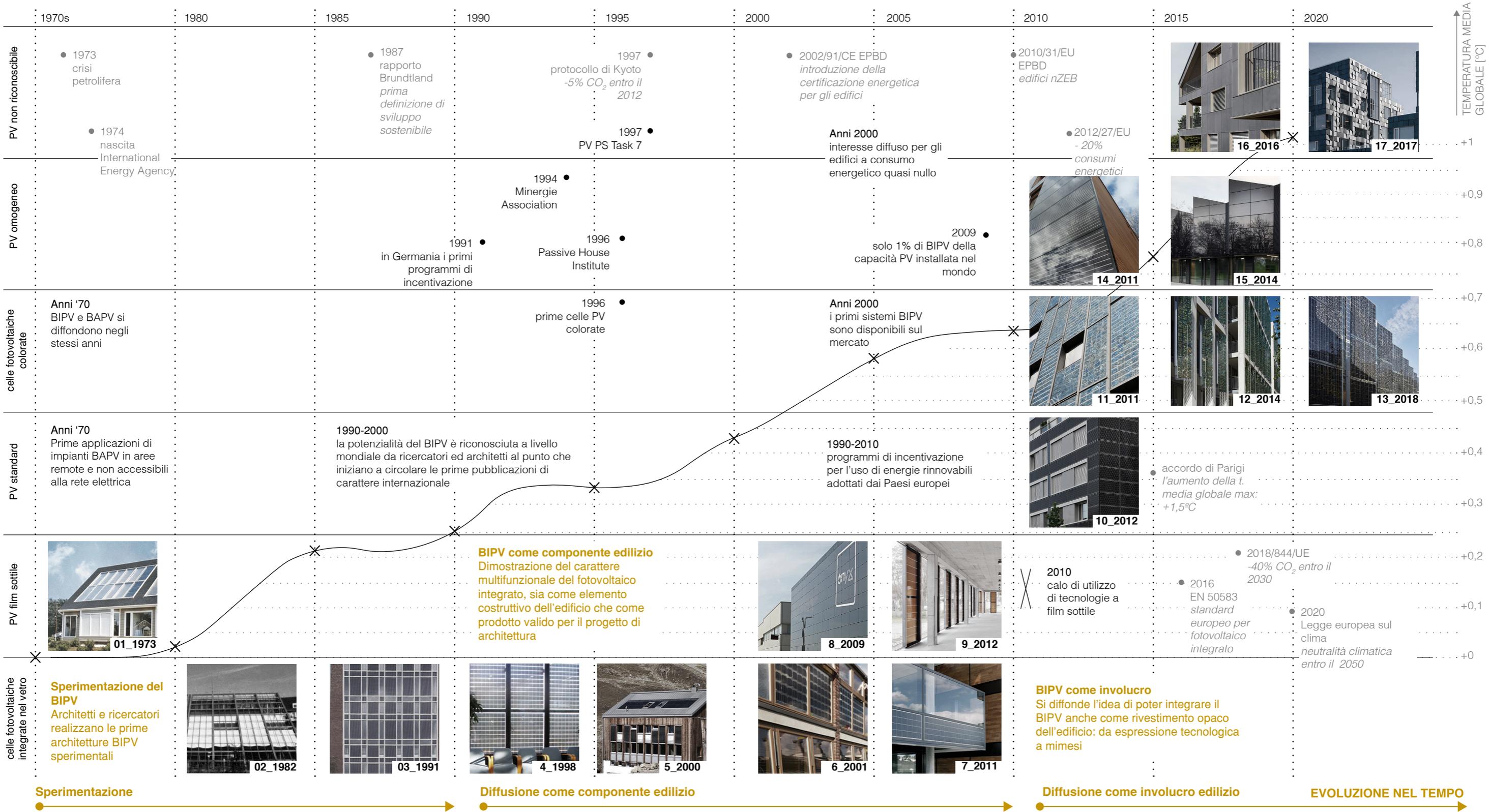
A tale scopo, le principali **fasi evolutive** collocate nell'ascissa temporale vengono incrociate dalle tecnologie fotovoltaiche che hanno dominato ciascuna fase evolutiva, delineandone l'**innovazione tecnologica** ed il relativo aspetto formale.

Questa matrice fase-tecnologia costituisce una griglia dove trovano propria collocazione temporale gli **eventi ed i passaggi cruciali per il BIPV** e gli **eventi storici e/o normative significative**.

La ricostruzione storica dei provvedimenti presi per ridurre i consumi energetici è accompagnata dalla curva della **temperatura media globale**, i cui dati vengono riportati con un'ordinata parallela. Tali dati relativi alla temperatura media globale sono stati ricavati dal sito *climate.nasa.gov* e sono stati presentati in figura 1, al paragrafo 1.1 *Antropocene*

I casi di integrazione BIPV vengono quindi inseriti nel rispettivo quadro storico e la traiettoria che intraprendono va letta come l'esito di fattori differenti.

(Elaborazione propria)



Iconografia

01_1973 Solar One, Università di Delaware, USA
(prima installazione fotovoltaica in un edificio)

02_1982 Complesso Richter, Thomas Herzog e Bernhard Schilling, Monaco, DE (primo esempio di celle PV integrate nel vetro)

03_1991 Edificio pubblico ad Aquisgrana, Georg Feinhals, DE
(prima facciata BIPV)

04_1998 Pompeu Fabra, Miquel Brullet i Tenas, Matarò, ES
(produzione di energia fotovoltaica e termica)

05_2000 Rifugio alpino Kesh Hutte, architetto Toni Spirig, Bergün Filisur, CH

06_2011 BedZED, Bill Dunster Architects, Londra, UK

07_2011 Hofberg 6 / 7, Fent Solare Architektur, Wil, CH

08_2009 The Back Box, architetto Angel Gallego, Avila, ES

09_2012 Galerie Under Strom Potsdam, O&O Baukunst, Potsdam, DE

10_2012 MFH Alleestrasse, Viriden+Partner Architektur, Romanshorn, CH

11_2011 Edificio residenziale, Emmanuel Saadi e Jean-Louis Rey, Parigi, FR

12_2014 Kingsgate House, HCL Architects, Londra, UK

13_2018 740 Fulham Road, HCL Architects, Londra, UK

14_2011 Casa Solara, Cerfedra Architekten, Laax, CH

15_2014 +e Kita, Opus Architekten BDA, Marburg, DE

16_2016 Edificio a Brütten, René Schmid, CH

17_2017 CIS Nordhavn, CF Moller Architects, Copenhagen, DK

Sperimentazione

1973 ————— 1990

- 1973** ● Il 1973 è anche l'anno della realizzazione di **Solar One** **figura 2**, la prima casa a convertire direttamente la radiazione solare sia in calore che elettricità per l'uso domestico. Realizzata dall'Università del Delaware, USA, Solar One è stata progettata come struttura sperimentale per accumulare dati dal suo sistema di raccolta energetica.



figura 2
Solar One, 1973

Il fondatore dell'Università, il professor Karl Böer, è stato tra i primi a riconoscere le potenzialità del fotovoltaico e, nello specifico, delle celle fotovoltaiche a film sottile accoppiate a collettori termici anche prima della crisi petrolifera, con l'istituzione nel 1972 dell'*Institute of Energy Conversion (IEC)*. (iec.udel.edu)

Solar One è quindi tra i primi edifici pionieri della tecnologia solare che con la sua integrazione sul tetto segna l'inizio del BIPV², nonché rappresenta il primo esempio di soluzione ibrida fotovoltaico / termico, una potenzialità che il paragrafo 4.4 *Altre traiettorie di ricerca* inquadrerà come un carattere di innovazione potenzialmente utile ma poco riconosciuto nel corso dell'evoluzione del BIPV.

La prima fase del BIPV, riconducibile agli anni Settanta e Ottanta, era quindi un periodo sperimentale che vedeva l'interesse di ricercatori ed architetti ambiziosi ed il diffondersi di architetture sperimentali e progetti dimostrativi.

2. Dal 2016 la normativa EN50583 delinea i requisiti necessari per identificare un prodotto come soluzione BIPV. In questa fase sperimentale, quindi, si cita il BIPV per intendere gli esempi pionieri di questa soluzione che ne presentano le caratteristiche di base, quali l'idea di integrazione funzionale e formale

Nel 1982 gli architetti Thomas Herzog e Bernhard Schilling realizzano in collaborazione con l'*Institute for Solar Energy System dell'Istituto di Fraunhofer* il **complesso residenziale Richter figura 3**, a Monaco in Germania. L'obiettivo del progetto era la realizzazione di un edificio prototipo dall'involucro trasparente e leggero, sul quale era possibile adottare la tecnologia fotovoltaica. Le unità residenziali sono collocate a schiera, sono realizzate con struttura lignea portante e sul fronte Sud prevedono un involucro esterno vetrato ed inclinato che funge da serra bioclimatica. Nella parte alta dell'involucro le celle fotovoltaiche integrate nel vetro producono l'energia necessaria all'uso domestico, che viene in parte stoccata in batterie o immessa nella rete elettrica locale. Il complesso Richter è tra i primi casi sperimentali in cui le celle fotovoltaiche vengono integrate in moduli vetrati, segnando quella strada oggi pienamente battuta che vede la combinazione della tecnologia fotovoltaica con l'elemento vetro. (SUPSI 2020) (bda-bund.de)



figura 3
Complesso residenziale
Richter, 1982

Anche nell'azienda vetraria Flachglas la potenzialità di combinare vetro e fotovoltaico fu ben presto compresa insieme all'idea di concepire il fotovoltaico non più come un elemento aggiunto ma come un componente edilizio integrato, con l'obiettivo di ridurre quanto possibile l'impatto visivo provocato dai pannelli fotovoltaici applicati alle coperture. (Zampino 2013)

"We very soon recognized that we were not able to compete with big oil companies or governmental subsidized Japanese concerns with standard photovoltaic modules. But as a glass company we were deeply involved in the architectural business, we knew how to build glass facades and glass roofs. Therefore we developed a strategy to use photovoltaic in buildings". (Benemann 2015)

Le celle solari venivano così incorporate tra due lastre di vetro tra le quali una resina trasparente e liquida veniva pompata e successivamente indurita dalla luce ultravioletta. *"The first step was to find a building to demonstrate the integration of photovoltaics into facade windows and very soon we found an quite interesting customer called STAWAG, the utility of the city of Aachen located just 100 km*

● 1982

away from our headquarters." (Benemann 2015)

1991 ● L'**edificio pubblico di Aquisgrana** (Aachen) in Germania, realizzato nel 1991, rappresenta quindi il primo edificio dotato di facciata fotovoltaica, una facciata semi-trasparente in cui le celle fotovoltaiche sono state integrate nei vetri isolanti prodotti da Flachglas **figura**



figura 4
Edificio pubblico
ad Aquisgrana, 1991

4. In quello stesso anno, la Germania fu il primo Paese nella storia ad introdurre programmi di incentivazione per l'uso di energie rinnovabili, ma in questo caso il progetto fu realizzato senza alcun finanziamento proveniente dallo Stato, dal momento che l'obiettivo degli incentivi era quello di adottare celle fotovoltaiche in copertura per massimizzare l'energia prodotta. Per le autorità locali di Aquisgrana, però, il valore dell'integrazione in facciata e del suo significato era più importante della fornitura di energia, scelta che ha aperto le porte a nuove opportunità per il fotovoltaico. (Crassard, Rode, 2007)

Già dalla prima fase sperimentale del BIPV, quindi, i ragionamenti in termini di aspetto formale del fotovoltaico seguivano di pari passo gli sviluppi tecnologici, sfruttando quello che all'epoca era il punto di partenza dell'innovazione; le celle fotovoltaiche integrate nei vetri erano visibili, ma l'integrazione dei moduli nel progetto permetteva loro di avere un nuovo aspetto e la distanza tra di esse ne garantiva la semitrasparenza, una condizione che ha caratterizzato l'aspetto formale del BIPV durante i suoi primi anni di diffusione.

/ sperimentazione



figura 2
Solar One, 1973



figura 3
Complesso residenziale Richter, 1982



figura 4
Edificio pubblico ad Aquisgrana, 1991

Diffusione del BIPV come componente edilizio



Nei primi anni Novanta le potenzialità che offriva una tecnologia all'epoca così innovativa come il BIPV erano riconosciute a livello mondiale anche dagli architetti e dalle industrie di produzione di componenti edilizi e l'interesse era tale da comportare la circolazione dei primi testi sul *Building Integrated Photovoltaics*. Tra questi, il testo di Othmar Humm e Peter Toggweiler *Photovoltaik und Architektur* pubblicato nel 1993 rappresentava la principale fonte di conoscenza ed ispirazione per gli architetti, sia per la trattazione esaustiva con la descrizione dei principali casi studio, sia per la chiarezza espositiva con cui venivano presentati gli aspetti progettuali e le questioni tecniche. La quasi totalità degli esempi riportati adottava la tecnologia fotovoltaica con celle di silicio integrate nel vetro e, ancora una volta, la progettazione del sistema PV e la semitrasparenza garantita dalla disposizione delle celle ne dimostrava un nuovo linguaggio architettonico. (Humm, Toggweiler, 1993)

Anche l'*International Energy Agency* riconosceva le potenzialità del BIPV al punto che all'interno di un accordo di ricerca e sviluppo stabilito dall'IEA, il programma *IEA Photovoltaic Power Systems (PVPS)*, nel 1997 iniziava la Task 7 Photovoltaic power systems in the built environment: un progetto internazionale che mirava a diffondere la cultura dell'integrazione del fotovoltaico nella progettazione architettonica, definendo le barriere tecniche e non tecniche del BIPV e fornendo strumenti utili alla sua comprensione.

In definitiva, gli anni Novanta sono caratterizzati dalla diffusione della conoscenza del BIPV con le prime pubblicazioni ed attività di

ricerca diffusi in tutto il mondo, ma sono anche quelli in cui i primi prodotti BIPV diventano disponibili sul mercato. A questo proposito, il programma *Photovoltaics: Building Opportunities in the United States* (PV:BONUS) dell'*U.S. Department of Energy's* (DOE's) aveva l'obiettivo di velocizzare il processo di combinazione della tecnologia fotovoltaica con gli elementi costruttivi di un edificio, al fine di aumentare la gamma di prodotti BIPV con nuovi componenti per le coperture, soluzioni curtain wall ed altri elementi vetrati. (Eiffert, Kiss, 2000)

Tra le architetture BIPV degli anni Novanta va ricordata la **libreria pubblica Pompeu Fabra** **figura 5** della città di Matarò, in Spagna, un progetto del 1998 che appartenente al programma della Carta di Aalborg³. La facciata sperimentale della libreria è uno dei primi casi di integrazione PV verticale, nonché uno dei pochi in cui la percezione visiva del fotovoltaico e la relativa produzione energetica sono accompagnati da riflessioni relative anche all'energia termica, dimostrando elevata maturità progettuale. Il fotovoltaico è integrato all'interno di un sistema di facciata continua semitrasparente con celle policristalline posizionate ad una distanza tale da garantire visibilità e proteggere l'ambiente interno come una schermatura solare. All'interno della facciata è presente un'intercapedine di pochi centimetri nella quale la radiazione solare viene bloccata e la temperatura dell'aria aumenta, simulando il principio di una serra; questo fenomeno viene sfruttato sia nei mesi freddi, quando l'aria pre-riscaldata viene utilizzata per il riscaldamento dell'edificio, sia in quelli caldi, quando il flusso di aria in movimento garantisce la ventilazione dei moduli fotovoltaici, riducendo la temperatura in prossimità delle celle fotovoltaiche. (solararchitecture.cronologia)



figura 5
Libreria pubblica
Pompeu Fabra, 1998

Uno degli aspetti che emerge dai progetti BIPV degli anni Novanta era la capacità di utilizzare procedure e materiali sperimentali per dimostrare come i sistemi fotovoltaici integrati non fossero destinati alla sola produzione di energia, ma che fossero veri materiali da costruzione per gli involucri degli edifici e valide soluzioni per il progetto di

3. La Carta di Aalborg, ovvero la Carta delle Città Europee per uno sviluppo durevole e sostenibile, è un'iniziativa di sostenibilità urbana approvata dai suoi partecipanti nel 1994

4. Si consulti il paragrafo 1.4 *Sguardo sull'Europa* ed il paragrafo 4.4 *Altre traiettorie di ricerca*

5. Ad oggi uno stimolo verso la riduzione dei consumi energetici viene fornito dai certificati energetici volontari o obbligatori per gli edifici, come la certificazione Passivhaus (Germania), gli standard Minergie (Svizzera), la certificazione Casa Clima (Italia)

6. Si consulti l'approfondimento riportato alla pagina successiva

architettura. (SUPSI 2020)

La crisi energetica del 1973 aveva lasciato un segno, una consapevolezza più matura che negli anni a seguire modificherà il modo di costruire.

Parallelamente all'entusiasmo verso lo sviluppo di una soluzione tecnologica che garantiva ad un sistema impiantistico un nuovo linguaggio, quindi, gli anni Settanta e Ottanta spostavano l'attenzione verso il consumo energetico degli edifici e le loro prestazioni, con una domanda di alloggi più qualitativa e la definizione di *sviluppo sostenibile*⁴. La consapevolezza della limitata disponibilità di risorse, come i combustibili fossili per l'approvvigionamento energetico, aveva guidato verso il concetto di casa passiva, un principio sviluppato negli Stati Uniti durante gli anni Ottanta e successivamente perfezionato dal fisico tedesco Wolfgang Feist fino alla fondazione del *Passivhaus Institute* (PHI) nel 1996⁵.

Ai fini di questa indagine, ed in modo particolare ai fini della presente sezione relativa all'evoluzione del fotovoltaico integrato nel progetto di architettura, è interessante inquadrare il concetto di *passive house* in una panoramica più ampia, che possa facilmente posizionarlo nel percorso evolutivo del BIPV finora tracciato.

Come suggerito dal termine, le abitazioni progettate secondo il concetto di casa passiva ed attestate con certificati energetici quali *Passivhaus*, *Minergie*, *Casa Clima*, raggiungono un fabbisogno termico talmente ridotto da ottenere un risparmio energetico di circa il 75% rispetto un edificio ordinario di nuova costruzione, a tal punto da poter fare a meno di un impianto di riscaldamento. (passipedia) Sebbene, quindi, il concetto di casa passiva abbia nella progettazione architettonica un ruolo indiscusso, è stato invece marginale il suo contributo nell'innovazione ed evoluzione del BIPV in facciata; dai primi esempi pionieristici di case passive, come il progetto di Feist realizzato nel quartiere Kranichstein a Darmstadt (Germania) nell'ambito dell'attività di ricerca **Experimental Housing Darmstadt Kranichstein K7** del 1991, ai progetti premiati più attuali, infatti, l'approvvigionamento energetico deve coprire una domanda così bassa tale per cui la produzione energetica in loco è una scelta sempre ricondotta all'integrazione fotovoltaica in copertura⁶.

In questo ragionamento, quindi, il modello della casa passiva non ha un vero ruolo per il BIPV di facciata, se non quello di farci assu-

Passive House e ruolo marginale per l'evoluzione BIPV



01



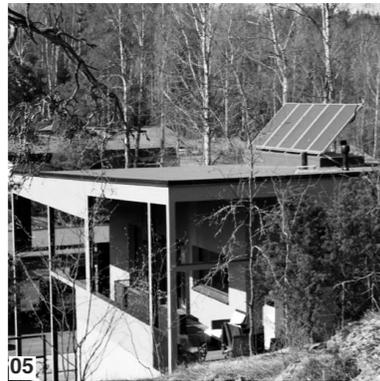
02



03



04



05



06

Esempi di architetture ad uso residenziale certificate PassivHaus e/o selezionate da CA EPBD

Gli edifici 01, 02, 03 sono stati presentati come casi notevoli in *Selected Examples of Nearly Zero-Energy Buildings* (CA EPBD 2014). Gli edifici 04, 05, 06 con certificazione PassivHaus sono disponibili sul sito Passive House Database (passivehouse.database)

1. Oggi il contenimento dei consumi energetici non è più strettamente vincolato alla scarsità delle risorse fossili, ma è dettato dalla necessità di ridurre l'emissione dei GHG

che l'utilizzo di queste stesse risorse fossili liberano nell'atmosfera

2. Per approfondire si consulti il capitolo 1 *Transizione energetica e architettura*

3. la carenza di informa-

zioni relative all'identità del progetto, quale il riferimento al progettista, all'interno di una pubblicazione centrata sull'analisi di casi studio considerati notevoli (CA EPBD 2014), denota per estensione una mancanza di attenzione anche all'aspetto progettuale

La forte spinta dell'ultimo trentennio verso i temi della sostenibilità ed il modello di casa passiva, sfociato nei successivi sforzi dell'UE per l'introduzione delle direttive sul rendimento energetico nell'edilizia (EPBD) e del concetto di edifici ad energia "quasi zero" (nZEB) con la 2010/31/EU EPBD, ha senza dubbio modificato il modo di costruire, approfondendo quelle riflessioni sugli aspetti costruttivi e tecnologici in favore di un maggiore contenimento dei consumi energetici¹.

Costruire meglio per spendere meno.

Lungi, quindi, dall'essere un'aperta critica alla traiettoria intrapresa dall'UE per efficientare il patrimonio edilizio², l'approfondimento vuole aprire una riflessione su come un tale modello di costruzione, che ha previsto e che tuttora prevede le giuste condizioni per un consolidamento delle energie rinnovabili in edilizia, non abbia rappresentato un elemento di slancio per l'innovazione del BIPV ed, al contrario, conta alcuni esempi di forme poco evolute rispetto all'integrazione solare, sia essa fotovoltaica che termica.

Al fine di chiarire il concetto, sono state selezionate architetture ad uso residenziale talvolta certificate PassivHaus (passivehouse.database), in altri casi selezionate dalla CA EPBD, iniziativa congiunta tra gli Stati membri dell'UE e la Commissione Europea per la condivisione di informazioni relative alle EPBD, nella pubblicazione *Selected Examples of Nearly Zero-Energy Buildings* del 2014 (CA EPBD 2014). Seppure i valori ridotti di energia primaria abbiano garantito a questi casi studio i titoli di casa passiva, la mancanza di una sensibilità compositiva di fronte alla necessità di adottare componenti impiantistici appare evidente³; negli stessi anni in cui il Building Integrated Photovoltaics tentava di consolidarsi come sistema al tempo stesso impiantistico e architettonico, il modello di casa passiva prediligeva l'adozione di impianti applicati (BAPV). Una spiegazione di tale dinamica potrebbe essere identificata nel radicale calo dei consumi energetici che gli edifici certificati e gli nZEB registrano, motivo per cui la produzione di quella quota di energia restante e ormai ridotta diventerebbe un aspetto solo secondario e, pertanto, talvolta trascurato.

A sostegno di questa ipotesi, infatti, le condizioni che questo lavoro di tesi riconosce come effettive spinte all'innovazione del BIPV appaiono ben distanti dal contesto della casa passiva e sono talvolta identificate nei casi in cui produrre energia autonomamente risultava necessario come in alcuni esempi di rifugi alpini, talvolta nelle spinte dettate da approcci interdisciplinari tra ricerca ed industria, che hanno condotto dagli esempi pionieristici come il progetto della Solar One nel 1973 ai più recenti casi di sperimentazione.

mere un atteggiamento inverso nei confronti della ricerca e riconoscere come spinta innovativa, invece, una condizione di necessità; vale a dire che un disagio, e quindi una necessità legata a quel disagio, spesso rappresenta il bacino da cui nasce un'innovazione. Nel caso specifico, quindi, fissando come intervallo temporale i primi anni Duemila, se da un lato si diffondeva il modello della casa passiva che richiedeva una fornitura energetica minima, dall'altro si riconoscono quei casi in cui la produzione energetica autonoma e l'autoconsumo erano condizioni necessarie per la vita dell'edificio.

Come è stato accennato, la diffusione negli anni Sessanta delle prime applicazioni di impianti fotovoltaici era circoscritta a quei contesti difficilmente raggiungibili dalla rete elettrica, per i quali quindi risultava necessaria una fonte di approvvigionamento energetico in loco; si dovrà aspettare ancora una decina d'anni prima di assistere ai primi progetti sperimentali BIPV degli anni Settanta. La necessità di un impianto elettrico *off-grids* (non allacciato ad una rete elettrica) è una condizione ancora attuale e piuttosto frequente se si considerano i rifugi alpini, che per questioni logistiche e/o economiche non sempre godono di una connessione alla rete elettrica; secondo uno studio del 2008 svolto nell'ambito del programma Interreg Italia-Francia "Qualification de l'offre des refuges de haute montagne pour un tourisme durable dans la Vallée d'Aoste ed les Pays de Savoie, – REFUGES" ed attuato dal Dipartimento di Scienze Merceologiche dell'Università di Torino, solo il 26% dei rifugi alpini di Valle d'Aosta e Savoia partecipanti al sondaggio erano allacciati alla rete elettrica, mentre tutti i restanti casi dovevano ricorrere all'adozione di impianti autonomi (Beltramo, Duglio 2009). Per incrociare nuovamente il tema del *Building Integrated Photovoltaics*, quindi, l'interesse verso i rifugi alpini proposto in questa sede è indirizzato verso quei casi in cui la necessità di produzione energetica autonoma è stata trasformata in opportunità progettuale e valore aggiunto.

Un caso degno di attenzione e utile per lo sviluppo di questo racconto è **Kesh Hutte** **figura 6**, un rifugio alpino progettato dall'architetto Toni Spirig e completato in Svizzera nel 2000. Distante dall'utilizzo di un tradizionale impianto fotovoltaico installato in copertura, nel progetto di Spirig la produzione energetica diventa una questione progettuale in cui le celle fotovoltaiche integrate in facciata rientrano in un preciso schema compositivo. Ancora una volta, una visione progettuale integrale ha evidenziato le potenzialità architettoniche di

7. Approfondimento del progetto al paragrafo 4.3 *Strategie di integrazione architettonica*

● 2000



figura 6
Rifugio alpino Kesh Hutte, 2000

un'innovazione tecnologica quale il BIPV in uno stadio che era ancora molto lontano dalle possibilità attuali, ma del tutto valido ed interessante in quel contesto storico.

2009 ● Con un salto temporale di una decina d'anni va collocato in questo percorso evolutivo anche il nuovo ed iconico **rifugio alpino del Monte Rosa** **figura 8** (2009) di proprietà del Club Alpino Svizzero, un caso in cui l'innovazione tecnologica è stata il frutto di una condizione al tempo stesso di esigenza e disponibilità di conoscenza⁸. La necessità di produrre energia elettrica in modo autonomo è stata considerata ancora una volta un'opportunità progettuale, giungendo ad un volume sfaccettato con una facciata fotovoltaica rivolta a Sud che dialoga con le altre attraverso soluzioni di continuità. L'eco rifugio nasce in occasione del 150° anniversario del Politecnico di Federale di Zurigo ed ha rappresentato un banco di lavoro condiviso al quale hanno collaborato gli studenti della facoltà di Architettura di Lucerna con il professor Andrea Deplazes, lo studio di architettura Bearth&Deplazes Architekten AG dello stesso professor Deplazes,



figura 8
Rifugio alpino Monte Rosa, 2009

ricercatori dell'EMPA (Istituto nazionale per la ricerca nel campo dei materiali ed il Politecnico di Zurigo. Ancora una volta, l'innovazione del BIPV è il frutto di un progetto interdisciplinare che vede il coinvolgimento di vari *stakeholders* capaci di collaborare e fare sistema in nome di obiettivi comuni.

8. Le condizioni di esigenza e disponibilità di conoscenza verranno meglio approfondite al paragrafo 4.4 *Altre traiettorie di ricerca* e sono concetti estratti dal testo *Sulle tracce dell'innovazione* di Nicola Sinopoli (2002)

● La combinazione di strategie passive e attive per ridurre il consumo degli edifici, ed in senso più ampio l'idea di uno stile di vita condiviso con un ridotto impatto ambientale, sono stati gli obiettivi raggiunti nel progetto di **Beddington Zero Energy Development** (BedZED) **figura 7**, un quartiere ad alta densità residenziale progettato da Bill

Dunster Architects, oggi ZEDFactory, in collaborazione con Arup e Bioregional Group. Completato nel 2002 nella periferia Sud di Londra, Bill Dunster voleva applicare a scala maggiore un approccio olistico zero-energy precedentemente adottato per la *Hope House*, progettando un quartiere residenziale misto ad attività terziarie che mostrasse una visione sostenibile dell'abitare. (Change 2009) A tale scopo, i ragionamenti sui consumi energetici degli edifici per ridurre le emissioni di CO₂ erano inclusi in una filosofia progettuale più ampia, combinati a riflessioni sull'impatto ambientale del processo di costruzione, sui trasporti, sulla produzione degli alimenti, sui sistemi di purificazione dell'acqua e sul tema del riciclaggio. Comparate con i valori medi degli appartamenti inglesi, la domanda di energia per l'acqua calda e quella per l'elettricità si sono ridotte rispettivamente dell'81% e del 45% attraverso la progettazione di sistemi passivi, tra cui: la disposizione degli uffici sul fronte Nord degli appartamenti come aree cuscinetto, *buffer zone* solari lungo il fronte Sud per regolare la temperatura interna degli appartamenti durante le stagioni; coibentazione e materiali ad elevata inerzia termica; camini di ventilazione a supporto di un sistema di ventilazione naturale passante; a questo va aggiunto l'utilizzo di elettrodomestici ad alta efficienza energetica e la presenza di contatori elettrici illuminati che potessero rendere gli utenti più consapevoli dei loro consumi. La quota di energia necessaria per il funzionamento del BedZED viene prodotta in loco attraverso fonti energetiche rinnovabili, tra cui il sistema fotovoltaico integrato in copertura ed in facciata ed un sistema di distribuzione di acqua calda e della restante quota di energia con caldaia a biomassa, il cui combustibile veniva fornito dalla TreeStation di Croydon fondata dallo stesso Bioregional Group per trasformare dagli scarti degli alberi in biomassa. Ognuna di queste scelte, accompagnate al tema dei trasporti con strategie di connessione interne ed esterne al quartiere per limitare l'utilizzo delle automobili, al consumo di acqua con sistemi di drenaggio urbano sostenibile ed un accurato progetto del suolo, al tema del riciclaggio e della produzione di alimenti, sono state pensate per maturare la sensibilità degli abitanti verso le tematiche ambientali. L'integrazione delle celle fotovoltaiche in com-



figura 7
Beddington Zero Energy
Development, 2001

ponenti edilizi di copertura e facciata, infatti, va inquadrato proprio in questa prospettiva, motivo per cui il progetto BedZED rappresenta una delle tappe necessarie al racconto dell'evoluzione del BIPV affrontato in questo lavoro; si colloca a metà strada tra l'entusiasmo condiviso in quegli anni verso una tecnologia BIPV in evoluzione ed un forte senso di responsabilità ambientale.

Dalle origini del fotovoltaico integrato sugli edifici, anche la tecnologia fotovoltaica a film sottile ha caratterizzato insieme alle celle di silicio l'evoluzione del BIPV, merito delle minori ricadute prestazionali in condizioni sfavorevoli: la stessa natura del fotovoltaico a film sottile, infatti, garantisce una perdita di efficienza molto minore di quella registrata delle celle al silicio quando il fotovoltaico si surriscalda e le temperature aumentano, motivo per cui è bene garantire una ventilazione quando si adotta un sistema fotovoltaico a celle PV; inoltre, in condizioni di scarsa irradiazione diretta, il fotovoltaico a film sottile riesce a convertire maggiore energia di quanto riescano le celle fotovoltaiche sfruttando la luce diffusa. Attraverso trattamenti di natura chimica, la tecnologia PV a film sottile garantisce un'ampia gamma di prodotti per soluzioni semitrasparenti e trasparenti che insieme al silicio amorfo, la tecnologia a film sottile più diffusa, hanno visto una progressiva evoluzione fino al 2010, anno dal quale se ne è registrato un brusco calo. Dal 2010 ad oggi, infatti, si è vista una netta prevalenza del fotovoltaico a celle mono o policristalline dovuta principalmente alla maggiore efficienza energetica rispetto alle tecnologie a film sottile che, quindi, offusca i vantaggi sopracitati⁹, ma anche a causa di un progressivo calo dei prezzi delle celle fotovoltaiche. (Heinstein, Ballif, Perret-Aebi, 2013)

9. La tecnologia fotovoltaica a celle mono e policristalline gode di un'efficienza energetica che va dal 10% al 20% circa, attualmente il massimo valore per le tecnologie fotovoltaiche. Il fotovoltaico a film sottile non raggiunge il 10%

Photovoltaik und Architektur Humm O.,
Toggweiler P. (1993)

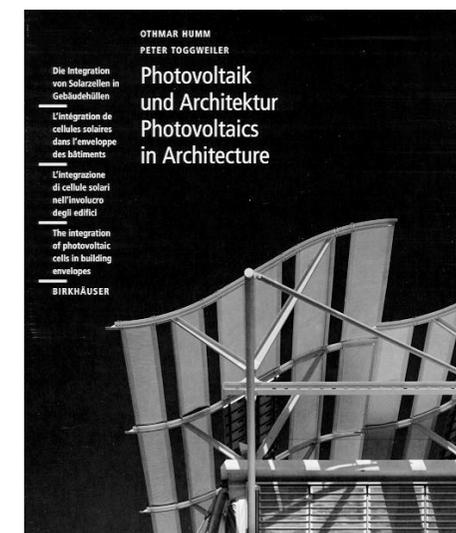




figura 5
Libreria pubblica Pompeu Fabra, 1998



figura 6
Rifugio alpino Kesh Hutte, 2000



figura 7
Beddington Zero Energy Development, 2001



figura 8
Rifugio alpino Monte Rosa, 2009

Il BIPV come *pelle* dell'edificio



Nonostante le architetture descritte finora abbiano dimostrato un interesse condiviso da parte di architetti e ricercatori verso la tecnologia fotovoltaica integrata, nel 2009 solo 1% di tutta la capacità PV installata su scala mondiale era prodotta da sistemi totalmente o parzialmente integrati, a causa dei prezzi del BIPV troppo elevati rispetto a quelli di altri materiali da costruzione da essere considerati economicamente competitivi. Così, al fine di implementare la diffusione dei sistemi fotovoltaici, diversi governi iniziavano ad introdurre rispettivamente i propri programmi di incentivazione per l'uso di energie rinnovabili, con esiti che, però, possono essere considerati contraddittori.

Partendo dalla Germania, nel 2000 è stato introdotto il *Renewable Energy Sources Act*, un programma di incentivazione che supportava l'utilizzo di impianti fotovoltaici con un piano tariffario di 50,62 eurocent/kWh (Crassard, Rode, 2007), ma senza dichiarare alcuna distinzione tra BIPV e BAPV; se da un lato questa strategia ha fortemente incoraggiato e rafforzato il mercato tedesco del fotovoltaico, dall'altra la mancata distinzione tra *integrazione* ed *applicazione* ha causato la netta prevalenza di sistemi BAPV, più economici, ed un ridottissimo 1% di sistemi integrati. (Heinstein, Ballif, Perret-Aebi, 2013)

Dal 2005 al 2013 anche in Italia l'utilizzo del fotovoltaico è stato supportato con i cinque piani di incentivazione per la produzione di energia da fonti rinnovabili, il *Conto Energia*; a differenza del contesto tedesco, però, l'Italia è stato uno dei pochi Paesi, insieme a Francia e Svizzera, ad introdurre il concetto di integrazione dell'impianto

sull'edificio, con tariffe incentivanti più vantaggiose nei casi di particolare attenzione al progetto di architettura e la conseguente classificazione in sistemi integrati, parzialmente integrati e non integrati. Sebbene l'intento del progetto fosse stato la valorizzazione delle soluzioni integrate, alcune modifiche introdotte progressivamente nel programma, come per esempio i successivi incrementi delle tariffe incentivanti su impianti maggiori di 3 kW anche se non integrati, alterarono le premesse iniziali, causando una grande bolla speculativa; se da un lato è aumentata la capacità installata di fotovoltaico in Italia, dall'altro si è verificato un utilizzo incontrollato di impianti fotovoltaici adottati senza troppe riflessioni sui concetti di integrazione e progettazione architettonica. (Zampino 2013) Tra il 2010 ed il 2011, in Italia sono stati spesi circa 10 miliardi di euro all'anno per l'importazione di pannelli fotovoltaici dalla Germania e dalla Cina, fino a quando al termine del suo quinto ciclo il *Conto Energia* non è stato più rinnovato, decretando il crollo del mercato fotovoltaico in Italia. (Bellicini 2020)

Escludendo, però, tali tentativi di diffusione della tecnologia integrata non virtuosi, dal 2010 iniziava quella fase del BIPV che, utilizzando l'espressione riportata in "*Building Integrated Photovoltaics: a practical handbook for solar buildings*" citato all'inizio (SUPSI 2020), vedeva il diffondersi di "architetture di PV standard". **La pratica di utilizzare vetro fotovoltaico per sostituire alcuni componenti dell'edificio aveva suscitato l'idea di poter adottare la stessa logica per tutto l'involucro, integrando il fotovoltaico anche come rivestimento opaco dell'edificio.** A questo, però, andavano aggiunte le necessità di ridurre i costi di investimento di un prodotto più complesso e di ottenere l'opacità necessaria, motivo per cui il mercato BIPV si spostò verso la produzione di elementi più standardizzati e facilmente integrabili. Si diffondeva così la pratica delle "architetture con PV standard" in cui l'involucro veniva completamente rivestito di moduli fotovoltaici standard che sostituivano i materiali da costruzione. Il concetto che aveva accompagnato l'evoluzione del BIPV nelle sue prime fasi, con architetture che mostravano i possibili nuovi utilizzi della tecnologia fotovoltaica, in quel momento raggiungeva il suo culmine; ed era proprio il messaggio di innovazione e sostenibilità che voleva essere trasmesso con questo nuovo linguaggio e che giustificava il costo addizionale del BIPV, la sua dichiarata visibilità. (PVPS T15-07 2019)

Un caso emblematico di questa tendenza è un **complesso residenziale a Romanshorn** **figura 9**, nella Svizzera tedesca, costruito negli anni Sessanta e riqualficato nel 2012 dallo studio di architettura Viriden+Partner AG. L'involucro dell'edificio è completamente rivestito di 295 m² di moduli fotovoltaici standard che vengono integrati come rivestimento opaco su tutti i fronti e che insieme ai moduli addizionali posizionati in copertura come BAPV garantiscono all'edificio un bilancio energetico positivo, ovvero si produce più energia di quanta ne serva.



● 2012

figura 9
Complesso residenziale
a Romanshorn, 2012

Pochi anni dopo, questo valore simbolico riconosciuto nell'immagine del fotovoltaico perderà di importanza e gli sviluppi tecnologici futuri permetteranno di attribuire nuovi requisiti. Erano anni di transizione in cui, quindi, alle "architetture con PV standard" si abbinavano anche prodotti BIPV opachi più complessi che rendevano la finitura dei moduli più omogenea.

Prima del 2016, anno in cui si incrociano i primi esempi BIPV completamente mimetici, per rendere l'aspetto finale del fotovoltaico integrato più omogeneo si ricorreva sempre a moduli PV vetro-vetro (come quelli adottati per i casi inquadrati nella fase "diffusione") ma una pellicola di colore simile alle celle fotovoltaiche veniva inserita sul retro dei queste ultime; anche l'assenza del telaio garantiva un aspetto più uniforme, espediente che verrà quindi fortemente adottato anche in futuro; visto da lontano, questa procedura garantiva all'edificio un'immagine uniforme, mentre un'analisi ravvicinata permetteva di riconoscerne la tecnologia.

A questo gruppo di architetture fa sicuramente parte **Casa Solara**¹⁰, un complesso residenziale realizzato nel 2011 da Cerfeda Architekten nella località sciistica di Laax, in Svizzera **figura 10**. In questo caso la facciata Sud è interamente rivestita con moduli fotovoltaici integrati di dimensioni customizzate, senza telaio, che dialogano in equilibrio con gli altri



● 2011

10. Approfondimento del progetto al paragrafo 4.3
Strategie di integrazione architettonica

figura 10
Casa Solara, 2011

11. La tendenza ad utilizzare soluzioni PV dall'aspetto omogeneo e mimetico non esclude, però, la volontà di alcuni architetti di proseguire, invece, la traiettoria della dichiarata visibilità della tecnologia fotovoltaica quale messaggio di innovazione e sostenibilità. Si considerino, ad esempio, i progetti King's Gate House e 740 Fulham Road firmati HCL Architects approfonditi al paragrafo 4.3 *Strategie di integrazione architettonica*

materiali del progetto. L'aspetto dei moduli PV è più uniforme per merito di una pellicola grigia sul retro delle celle ed uno smalto nero aggiuntivo che creano un effetto a strisce orizzontali che richiama la linearità degli elementi in legno presenti negli altri prospetti.

Come anticipato, il 2016 ha confermato quell'inversione di tendenza rispetto alla visibilità del fotovoltaico e ha segnato l'inizio di quello che può essere definito come BIPV mimetico. La direttiva europea EPBD 2010/31/EU imponeva che tutti gli edifici di nuova costruzione fossero ad energia "quasi" zero entro il 31 dicembre 2020 (2010/31/UE), per cui il BIPV risultava una soluzione valida al fine di produrre energia rinnovabile in loco; in aggiunta, la direttiva 2012/27/UE imponeva il valore minimo di 20% di riduzione dei consumi energetici entro lo stesso anno (2012/27/UE). Queste normative sulle prestazioni energetiche degli edifici disegnavano scenari in cui il fotovoltaico avrebbe preso sempre maggiore sopravvento ma come risultato, invece di riconoscere il valore del BIPV nella sua aperta dichiarazione, veniva ricercato nella sua invisibilità. (PVPS T15-07 2019)

Alle celle scure visibili, oggi si preferiscono prodotti customizzati dall'aspetto più omogeneo che possano trovare un equilibrio tra l'innovazione tecnologica ed i modelli della tradizione; è per questo motivo che oggi il principale carattere di innovazione del BIPV risiede nella ricerca di una tecnologia fotovoltaica il cui aspetto finale possa favorire un maggiore trasferimento nel mercato edilizio, condizione possibile per merito di ricerca e sviluppi tecnologici che garantiscono nuovi trattamenti di colorazione del vetro¹¹.

Alla luce della costante ricerca sul design del BIPV e del predominio dei prodotti PV mimetici, è possibile tracciare una diramazione che in tempi del tutto attuali sta delineando nuove potenzialità architettoniche ed espressive per il progetto di architettura.

Da un lato, coerentemente con quanto già in parte avvenuto nel percorso evolutivo del BIPV, il progetto di architettura si lega in modo indissolubile con la ricerca ed il settore impresa, diventando uno strumento



figura 11
Condominio Hofwiesenstrasse, 2016

di elaborazione di nuove strategie. A questo gruppo appartiene la maggioranza dei progetti di architettura BIPV degli ultimi anni, che talvolta sono il risultato di progetti pilota finanziati da un consorzio pubblico o privato, come il **progetto pilota del 2016 della Hofwiesenstrasse** per la riqualificazione di un condominio di Zurigo¹² completamente rivestito di moduli fotovoltaici satinati non riconoscibili (Viriden+Partners Architektur) **figura 11**, altre volte sono il frutto della volontà dei progettisti di adottare soluzioni innovative prodotte dal lavoro combinato del settore impresa e mondo della ricerca, come il primo **edificio energeticamente autosufficiente a Brütten**¹³ del 2016 con moduli PV non riconoscibili per merito di processi di sabbiatura (René Schmid Architekten) **figura 12**, il palazzo **Solaris a Zurigo**¹⁴ del 2017, con moduli fotovoltaici trattati *ad hoc* con stampa digitale su vetro-ceramica (Huggenbergerfries Architekten) **figura 13**; anche se esterno al settore residenziale, si ricorda anche il caso della **Copenhagen International School** del 2017 (CF Møller Architects) **figura 14** che detiene il primato per la più grande facciata fotovoltaica mai realizzata, ma che in questa sede diventa oggetto di interesse per l'approccio collaborativo adottato, in cui la tecnologia fotovoltaica *Kromatix* sviluppata dall'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) trova una sua compiutezza nella realizzazione di moduli fotovoltaici prodotti da SwissInso e diventa il simbolo del progetto di CF Møller Architects.

Dall'altro lato, invece, il progetto di architettura continua ad essere legato al mondo della ricerca ed al settore impresa ma in questo caso ne diventa l'espressione stessa di questa collaborazione interdisciplinare. Alle *buone pratiche* BIPV¹⁵ citate in precedenza, si affiancano i *progetti dimostratori*, in cui la risposta all'urgenza di aumentare l'efficienza energetica degli edifici si presenta sottoforma di prototipi *full scale* per il monitoraggio di nuove tecnologie; si delinea una condizione di interdisciplinarietà tra la ricerca applicata ed il sistema impresa che in collaborazione con i progettisti ha guidato verso la realizzazione di progetti di architettura, come nel caso del progetto **NEST** di Zurigo del 2016¹⁶ **figura 15**; il centro di innovazione degli istituti di ricerca *Empa* e *Eawag* è progettato come un *living lab*, ovvero come un edificio in cui le nuove tecnologie vengono testate in ambienti che al tempo stesso sono anche uffici e residenze. La realizzazione di un'architettura come il NEST, in cui si intrecciano i rapporti tra ricerca e industria, potrebbe quindi proporre una visione

● 2016

● 2016

● 2017

● 2017

12. Approfondimento del progetto al paragrafo 4.3 *Strategie di integrazione architettonica*

13. Approfondimento del progetto al paragrafo 4.3 *Strategie di integrazione architettonica*

14. Approfondimento del progetto al paragrafo 4.2 *Tra forma e per(forma)nza*

15. Si intendano per *buone pratiche* i progetti di architettura BIPV tradizionalmente intesi che, quindi, escludono i casi di progetti dimostratori guidati dalla ricerca

● 2016

16. Si veda il paragrafo 4.5 *Approcci interdisciplinari con approfondimento del progetto NEST*

nella quale il progetto di architettura potrà essere il risultato di questo approccio sinergico, rappresentando uno strumento per elaborare e mettere in scena nuovi modelli di innovazione.

Le ultime normative sulle prestazioni energetiche degli edifici, in particolare la Direttiva che modifica la Direttiva sulle prestazioni energetiche nell'edilizia (2018/844/UE) e la sfida accettata dall'Europa con il Green Deal Europeo di raggiungere entro il 2050 la neutralità climatica delineano scenari in cui la produzione energetica da fonti rinnovabili e il concetto di autosufficienza energetica richiederanno un utilizzo più diffuso del BIPV ed i casi degli ultimi anni sono un chiaro esempio di come questo possa avvenire, merito di un'innovazione tecnologica capace di garantire al tempo stesso produzione energetica e qualità architettonica.



figura 12
Edificio energeticamente
autosufficiente a Brütten, 2016



figura 15
Nest, 2016



figura 14
Copenhagen International School,
2017



figura 13
Palazzo Solaris, 2017

/ pelle dell'edificio



figura 9
Complesso residenziale a Romanshorn, 2012
(architetture con PV standard)



figura 10
Casa Solara, 2011
(architetture con PV omogeneo)



figura 11
Condominio Hofwiesenstrasse, 2016
(architetture con PV mimetico)



figura 12
Edificio energeticamente autosufficiente a Brütten, 2016
(architetture con PV mimetico)



figura 13
Palazzo Solaris, 2017
(architetture con PV mimetico)



figura 14
Copenhagen International School, 2017
(architetture con PV mimetico)



figura 15
Nest, 2016
(living lab)

Iconografia

figura 2 Solar One, Università del Delaware, USA
<https://research.udel.edu/2015/10/12/solar-strong/>

figura 3 Complesso Richter, Thomas Herzog e Bernhard Schilling, Monaco, DE
<https://www.bda-bund.de/awards/wohnanlage-richter-muenchen/>

figura 4 Edificio pubblico ad Aquisgrana, Georg Feinhals, DE
<https://doi.org/10.1515/green-2013-0020>

figura 5 Pompeu Fabra, Miquel Brullet i Tenas, Matarò, ES
<https://solarchitecture.ch/it/cronologia/#1559812646314-b65d885a-36d0>

figura 6 Rifugio alpino Kesh Hutte, architetto Toni Spirig, Bergün Filisur, CH
<https://famigros.migros.ch/it/gite-e-tempo-libero/escursioni-per-famiglie/capanna-cas-kesch>

figura 7 Beddington Zero Energy Development, Bill Dunster Architects, Londra, UK
<https://www.teknoring.com/news/green-building/edifici-nzeb-nel-mondo-bedzed-a-londra-il-complesso-pioniere/>

figura 8 Rifugio alpino Monte Rosa, Bearth & Deplazes, Zermatt, CH

figura 9 Complesso residenziale a Romanshorn, Viriden +Partner AG, CH
Corti P., Bonomo P., Frontini F., Building Integrated Photovoltaics: a practical handbook for solar buildings. Status Report 2020

figura 10 Casa Solara, Cerfeda Architekten, Laax, CH
<http://www.ecobauhaus.ch/laax.html>

figura 11 Condominio Hofwiesenstrasse, Viriden+Partner Architektur, Zurigo, CH
<https://apting.ch/referenz/mfh-hofwiesenstrasse-22-zuerich>

figura 12 Edificio a Brütten, René Schmid, CH
<https://reneschmid.ch/projekte/mehrfamilienhaeuser/detail/erstes-energieautarkes-mehrfamilienhaus-bruetten>

figura 13 Palazzo Solaris, Huggenbergerfries Architekten, Zurigo, CH
<https://www.lamberts.info/en/project/solaris/>

figura 14 CIS Nordhavn, CF Moller Architects, Copenhage, DK
<https://www.cfmoller.com/p/Copenhagen-International-School-Nordhavn-i2956.html>

figura 15 NEST, Zurigo, CH
<https://www.rsi.ch/rete-tre/programmi/intrattenimento/baobab/tell-me/NEST-gli-edifici-del-futuro-11263731.html>

2.5 **PANORAMA EUROPEO: casi studio selezionati**

La ricostruzione del processo evolutivo del BIPV ha permesso di evidenziare le principali tappe di un'innovazione tecnologica quale il BIPV e la velocità con cui tali traguardi tecnologici sono stati raggiunti dal mondo della ricerca e dal settore industriale, delineando sempre nuovi percorsi per il progetto di architettura.

Ciò nonostante, la rapidità di innovazione complessivamente abbastanza recente, insieme ad una mancata integrazione tra diverse competenze quali la progettazione architettonica e quella impiantistica, rende l'integrazione fotovoltaica un argomento ancora di nicchia e distante dalla storia dell'architettura, limite che ha imposto al lavoro di tesi un approccio metodologico di tipo esplorativo.

Da qui, quindi, deriva un primo studio dei casi BIPV in facciata al fine di evidenziare le principali strategie di integrazione, le forme, i colori, i produttori, i luoghi in cui è presente una maggiore diffusione e costruire insieme ai precedenti paragrafi del capitolo una panoramica dell'argomento sufficientemente completa per elaborare delle prime riflessioni.

Rispetto al tema della transizione energetica ed il peso del settore delle costruzioni proposto al capitolo 1 *Transizione energetica e architettura*, si è scelto di selezionare progetti di architettura di nuova costruzione e riqualificazione principalmente a destinazione d'uso residenziale, selezionando casi studio collocati in un intervallo temporale definito dagli ultimi due decenni.



PALAZZO SOLARIS

1

**Huggenbergerfries
Architekten**

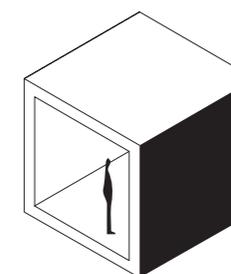
Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2017
Zurigo, CH

Schweizer Solarpreis 2018

*Innovation Award for
Building-Integrated Photovoltaics*



FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA
SUPERFICIE ATTIVA	400 m ² FACCIATA (+ 200 m ² COPERTURA)
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD / EST / OVEST / NORD
SISTEMA TECNOLOGICO	FACCIATA VENTILATA



INTEGRAZIONE

PRODUTTORE	ERTEX SOLAR
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO MONOCRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-VETRO
CARATTERISTICA VISIVA	MIMETICO
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	APPLICAZIONE DI PASTA CERAMICA
POTENZA NOMINALE	116 Wp/m ²
EFFICIENZA MODULO	13%



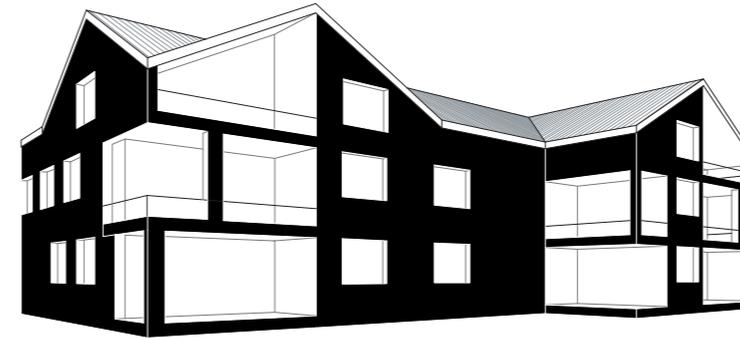
MODULO PV

PRODUZIONE ENERGETICA	31832 kWh/yr FACCIATA + COPERTURA
POTENZA NOMINALE	46 kWp FACCIATA + (25 kWp COPERTURA)
AUTOCONSUMO	 47%

ENERGIA



EDIFICIO ENERGETICAMENTE AUTOSUFFICIENTE A BRÜTTEN



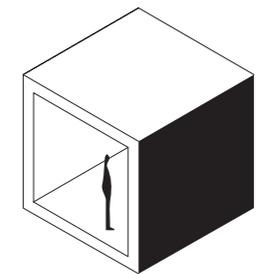
René Schmid Architekten AG

Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2016
Brütten, CH

Energy Globe Award Svizzera 2018

Norman Foster Solar Award 2016

FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA
SUPERFICIE ATTIVA	470 m ² FACCIATA (+ 527 m ² COPERTURA)
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD / EST / OVEST / NORD
SISTEMA TECNOLOGICO	FACCIATA VENTILATA



INTEGRAZIONE

PRODUTTORE	-
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO A FILM SOTTILE
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-FILM
CARATTERISTICA VISIVA	MIMETICO
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	SABBIATURA
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	-



MODULO PV

PRODUZIONE ENERGETICA	27000 kWh/yr FACCIATA (+ 65000 kWh/yr COPERTURA)
POTENZA NOMINALE	47 kWp FACCIATA + (79.5 kWp COPERTURA)
AUTOCONSUMO	 100% + na%

ENERGIA



CONDOMINIO HOFWIESENSTRASSE

3



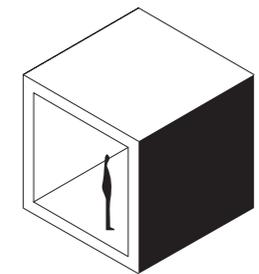
Karl Viridén + Partner AG

Complesso residenziale
Riqualificazione, 2016
Zurigo, CH

Schweizer Solarpreis 2017

*Prixforix 2018, Award for the most
attractive facade in Switzerland,
Audience Award*

FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA
SUPERFICIE ATTIVA	1586 m ² FACCIATA (+ 165 m ² COPERTURA)
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD / EST / OVEST / NORD
SISTEMA TECNOLOGICO	FACCIATA VENTILATA



INTEGRAZIONE

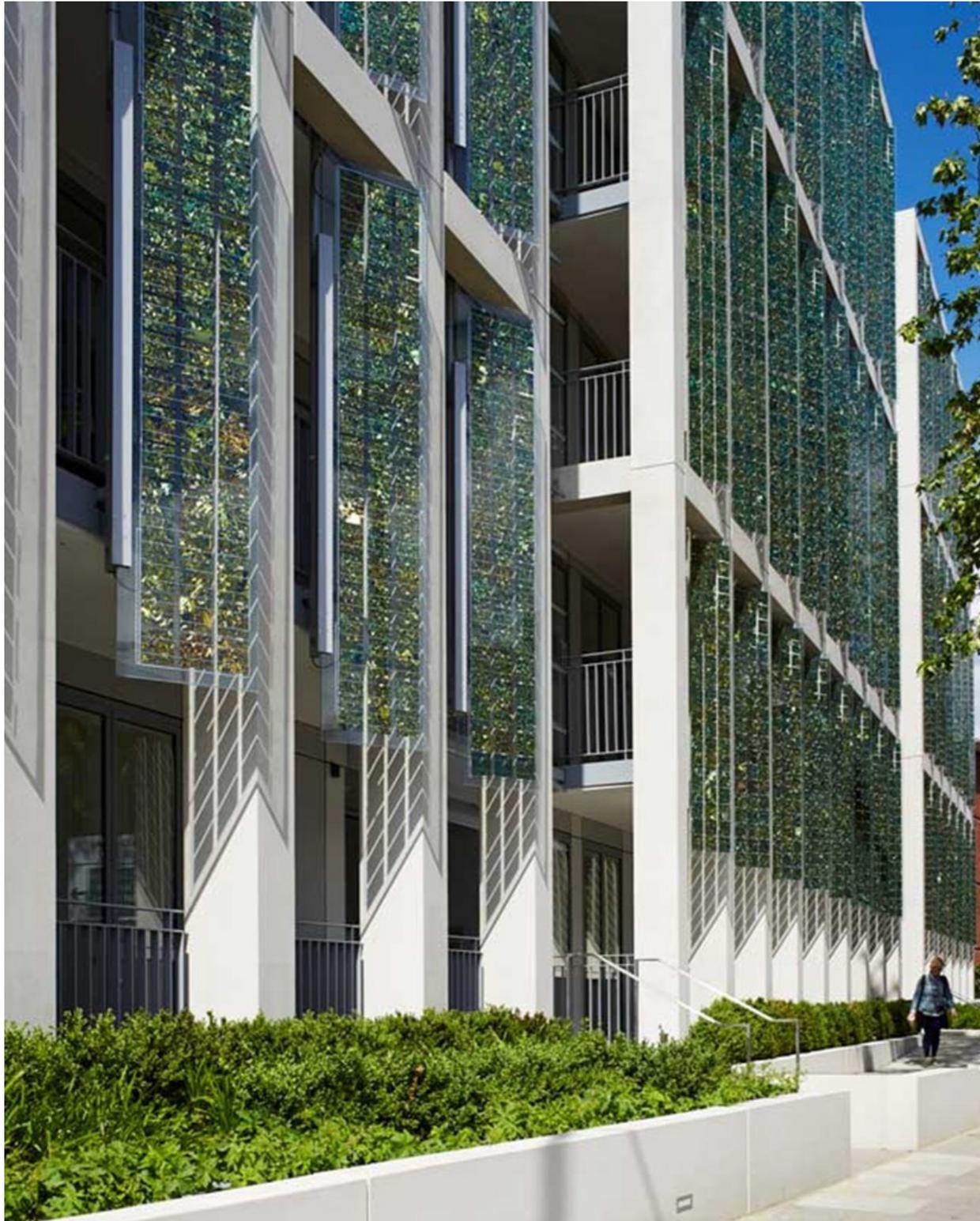
PRODUTTORE	PVP PHOTOVOLTAIK GMBH
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO MONOCRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-VETRO
CARATTERISTICA VISIVA	MIMETICO
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	RIVESTIMENTO SATINATO E STAMPA SU VETRO
POTENZA NOMINALE	110 Wp/m ²
EFFICIENZA MODULO	-



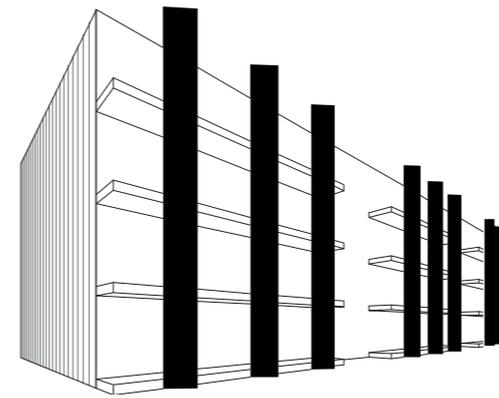
MODULO PV

PRODUZIONE ENERGETICA	82000 kWh/yr FACCIATA + COPERTURA
POTENZA NOMINALE	159 kWp FACCIATA + (20 kWp COPERTURA)
AUTOCONSUMO	 98%

ENERGIA



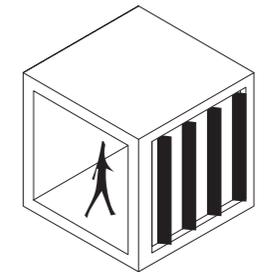
KINGSGATE HOUSE



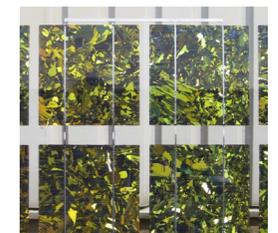
FORMA DI INTEGRAZIONE	SCHERMATURA SOLARE
SUPERFICIE ATTIVA	188 m ²
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD
SISTEMA TECNOLOGICO	SISTEMA DI MONTAGGIO SHADOWVOLTAIC DI COLT

PRODUTTORE	ROMAG
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO POLICRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-VETRO
CARATTERISTICA VISIVA	FOTOVOLTAICO RICONOSCIBILE
TRASPARENZA	SEMITRASPARENTE
TRATTAMENTO COLORE	CELLE FOTOVOLTAICHE COLORATE
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	17,60-15,20%

PRODUZIONE ENERGETICA	13145 kWh/yr
POTENZA NOMINALE	-
AUTOCONSUMO	 20%



INTEGRAZIONE



MODULO PV

ENERGIA

HCL Architects

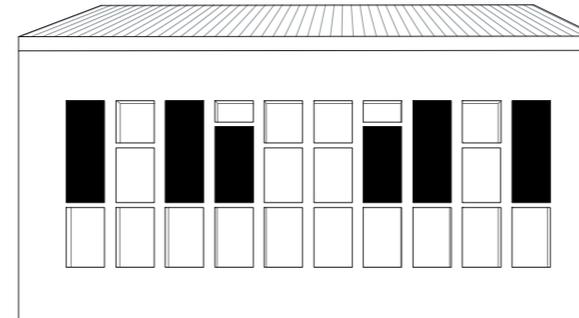
Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2014
Londra, UK

*Best Affordable Housing Scheme at
24 Housing Awards 2014*



KESH HUTTE

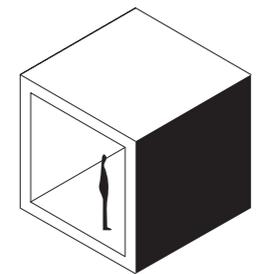
5



Toni Spirig

Rifugio alpino
Nuova costruzione, 2000
Bergün Filisur, CH
Schweizer Solarpreis 2001

FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA
SUPERFICIE ATTIVA	21,7 m ²
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD
SISTEMA TECNOLOGICO	MODULI INTELAIATI



INTEGRAZIONE

PRODUTTORE	-
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO MONOCRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO STANDARD
CARATTERISTICA VISIVA	FOTOVOLTAICO RICONOSCIBILE
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	NESSUNO
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	-



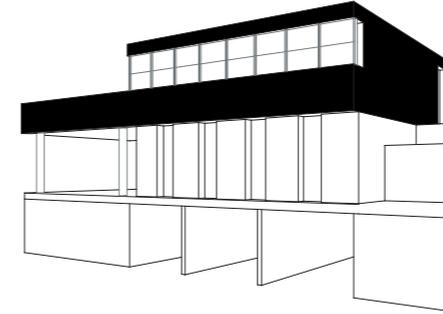
MODULO PV

PRODUZIONE ENERGETICA	3100 kWh/yr
POTENZA NOMINALE	2,7 kWp
AUTOCONSUMO	 76%

ENERGIA



DOPPEL-EFH H8



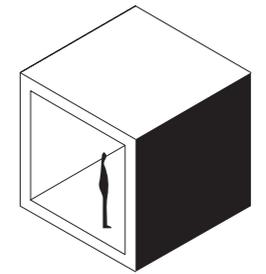
FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA
SUPERFICIE ATTIVA	-
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD / EST / OVEST
SISTEMA TECNOLOGICO	SISTEMA PREFABBRICATO

PRODUTTORE	LUCIDO SOLAR
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO MONOCRISTALLINO, CELLE BIFACCIALI
MODULO PV	COMPONENTE SOLARE IBRIDO <i>LUCIDO SOLINO</i>
CARATTERISTICA VISIVA	FOTOVOLTAICO RICONOSCIBILE
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	NESSUNO
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	-

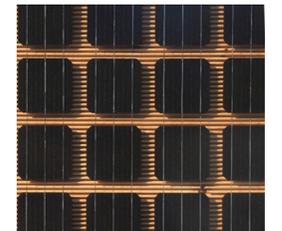
PRODUZIONE ENERGETICA	12447 kWh/yr
POTENZA NOMINALE	-
AUTOCONSUMO	 100% + 28%

Fent Solare Architekture

Villa bifamiliare
Nuova costruzione, 2015
Wil, CH
*PlusEnergieBau® -
Diplom für PEB MFH 16*

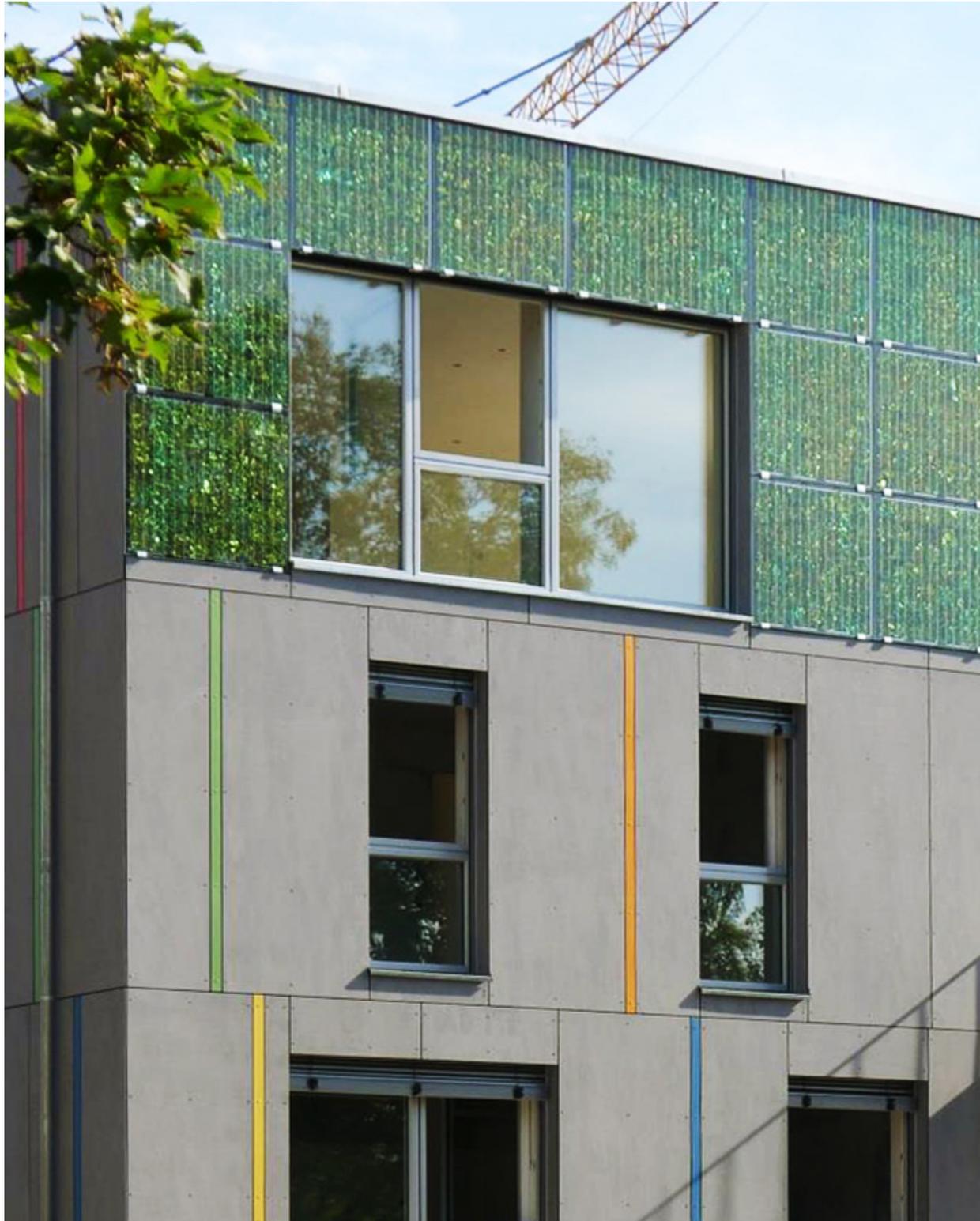


INTEGRAZIONE

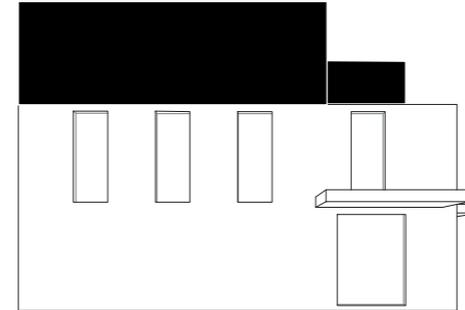


MODULO PV

ENERGIA



LICHT & LUFT

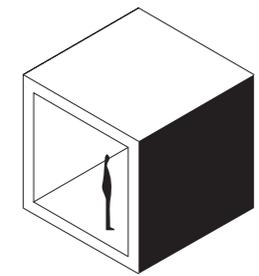


FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA
SUPERFICIE ATTIVA	341 m ² FACCIATA + COPERTURA
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD-EST / SUD-OVEST
SISTEMA TECNOLOGICO	FACCIATA VENTILATA

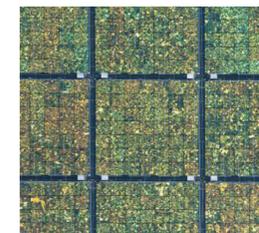
PRODUTTORE	ERTEX SOLAR
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO POLICRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-VETRO
CARATTERISTICA VISIVA	FOTOVOLTAICO RICONOSCIBILE
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	CELLE FOTOVOLTAICHE COLORATE
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	-

PRODUZIONE ENERGETICA	37000 kWh/yr
POTENZA NOMINALE	36 kWp
AUTOCONSUMO	 75%

Wamsler Architekten
 Complesso residenziale
 Nuova costruzione, 2013
 Tubinga, DE



INTEGRAZIONE

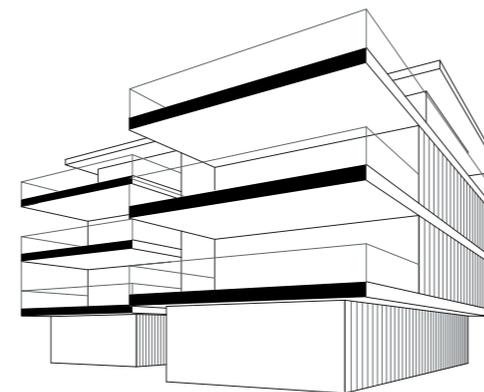


MODULO PV

ENERGIA



HOLFBERG 6/7



FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA (RIVESTIMENTO MARCAPIANO)
SUPERFICIE ATTIVA	51 m ² FACCIATA (+ 294 m ² COPERTURA)
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD
SISTEMA TECNOLOGICO	-

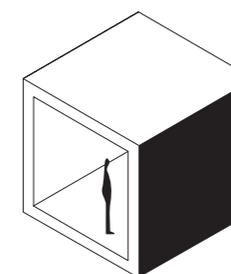
PRODUTTORE	LUCIDO SOLAR
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO MONOCRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-FILM
CARATTERISTICA VISIVA	FOTOVOLTAICO RICONOSCIBILE
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	NESSUNO
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	-

PRODUZIONE ENERGETICA	5650 kWh/yr FACCIATA (+ 49650 COPERTURA)
POTENZA NOMINALE	8 kWp FACCIATA + (142,8 kWp COPERTURA)
AUTOCONSUMO	100%

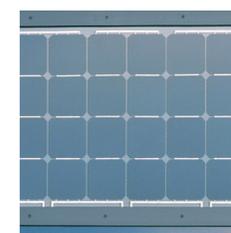
Fent Solare Architektur

Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2011
Wil, CH

Norman Foster Solar Award 2012



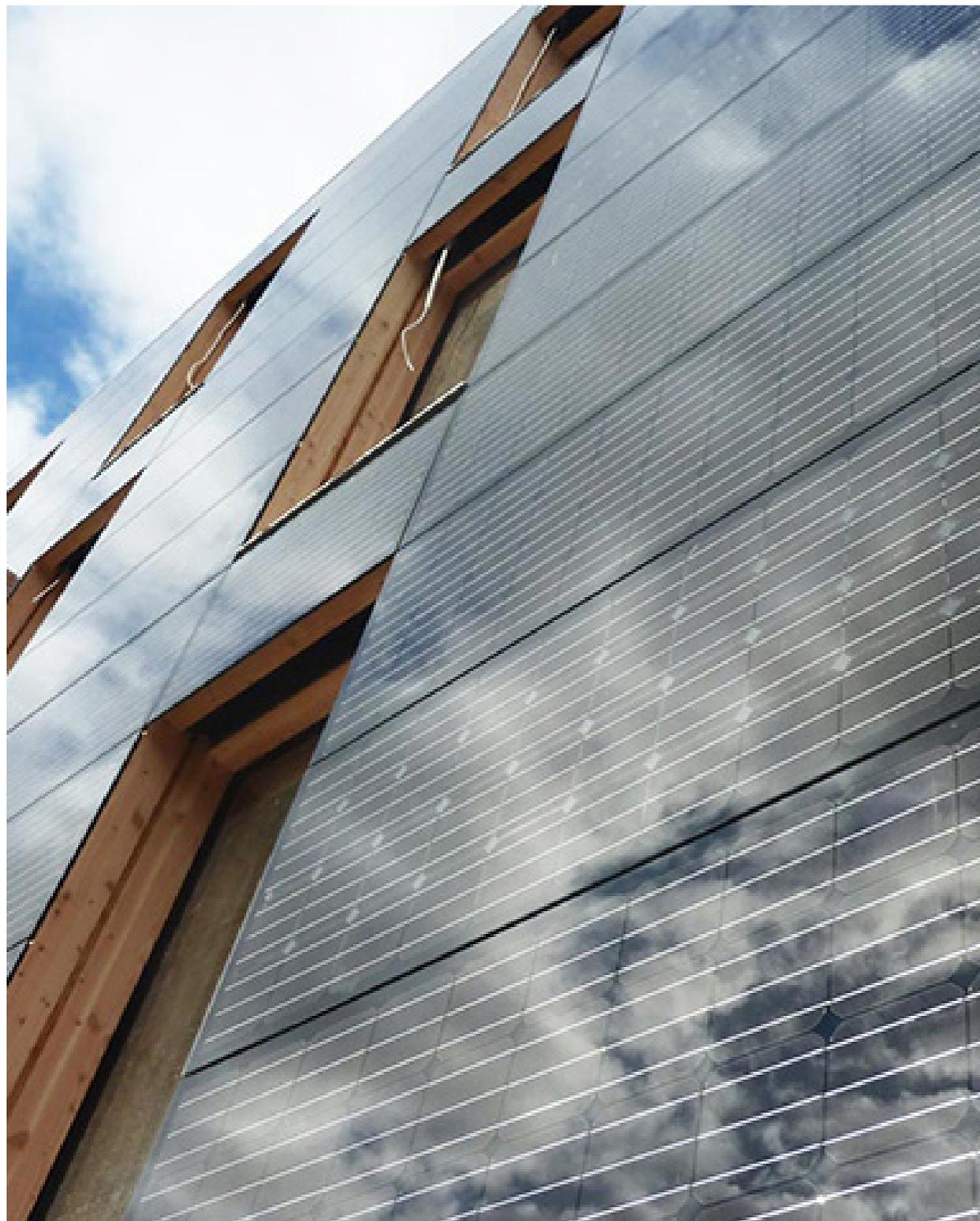
INTEGRAZIONE



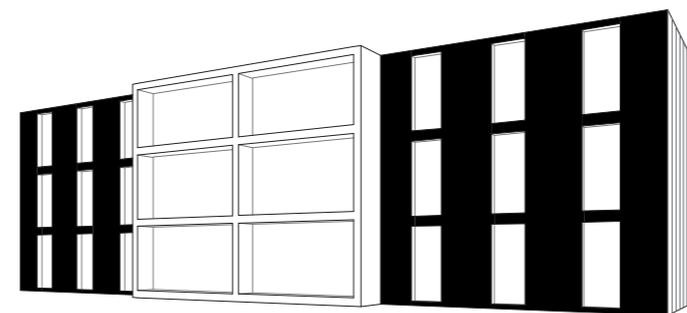
MODULO PV

ENERGIA

+86%



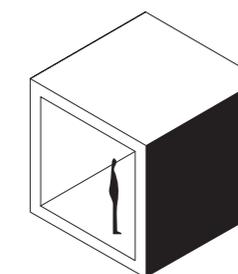
CASA SOLARA



Cerfeda Architekten

Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2011
Laax, CH

FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA
SUPERFICIE ATTIVA	346 m ² FACCIATA
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD
SISTEMA TECNOLOGICO	FACCIATA VENTILATA, SISTEMA BREVETTATO <i>UNDERCUT</i>



INTEGRAZIONE

PRODUTTORE	MGT-ESYS GMBH
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO MONOCRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-VETRO
CARATTERISTICA VISIVA	FOTOVOLTAICO RICONOSCIBILE
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	PELLICOLA SCURA SUL RETRO DELLE CELLE
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	-



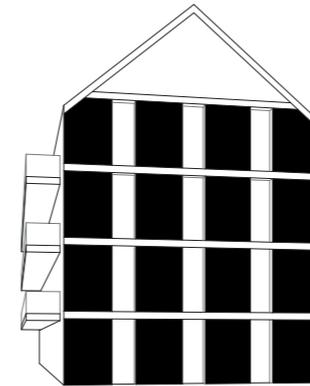
MODULO PV

PRODUZIONE ENERGETICA	25000 kWh/yr
POTENZA NOMINALE	34,4 kWp
AUTOCONSUMO	<input type="text"/> na

ENERGIA



CONDOMINIO CHRÜZMATT



FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA
SUPERFICIE ATTIVA	74 m ² FACCIATA (+ 276 m ² COPERTURA)
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	OVEST (+ FALDE SUD E NORD)
SISTEMA TECNOLOGICO	FACCIATA VENTILATA

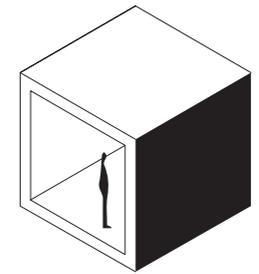
PRODUTTORE	ERTEX SOLAR
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO MONOCRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-VETRO
CARATTERISTICA VISIVA	MIMETICO
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	SERIGRAFIA
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	-

PRODUZIONE ENERGETICA	6451 kWh/yr FACCIATA (+ 39391 COPERTURA)
POTENZA NOMINALE	12,3 kWp FACCIATA + (50,4 kWp COPERTURA)
AUTOCONSUMO	 50%

10

Architetto Mark Röösl

Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2016
Aesch, CH



INTEGRAZIONE

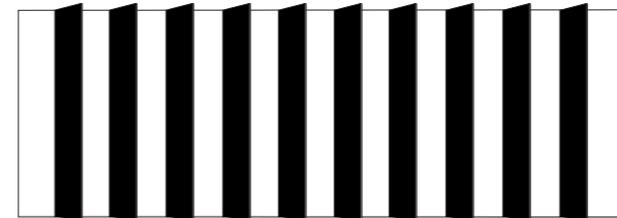


MODULO PV

ENERGIA

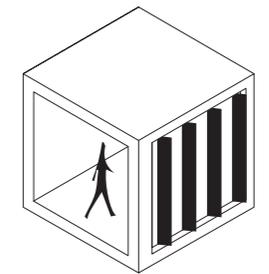


740 FULHAM ROAD



HCL Architects

Complesso residenziale
Riqualificazione, 2018
Londra, UK



INTEGRAZIONE

FORMA DI INTEGRAZIONE	SCHERMATURA SOLARE
SUPERFICIE ATTIVA	72 m ² FACCIATA
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	SUD-EST
SISTEMA TECNOLOGICO	-

PRODUTTORE	ROMAG
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO POLICRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-VETRO
CARATTERISTICA VISIVA	FOTOVOLTAICO RICONOSCIBILE
TRASPARENZA	SEMITRASPARENTE
TRATTAMENTO COLORE	CELLE FOTOVOLTAICHE COLORATE
POTENZA NOMINALE	-
EFFICIENZA MODULO	-



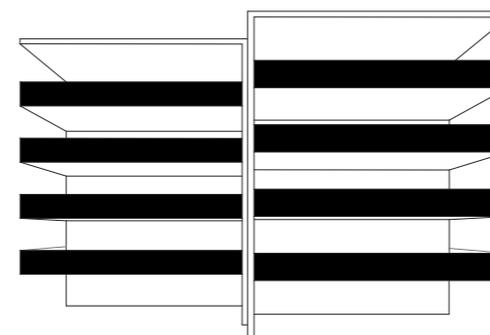
MODULO PV

PRODUZIONE ENERGETICA	-
POTENZA NOMINALE	3 kWp
AUTOCONSUMO	 50%

ENERGIA



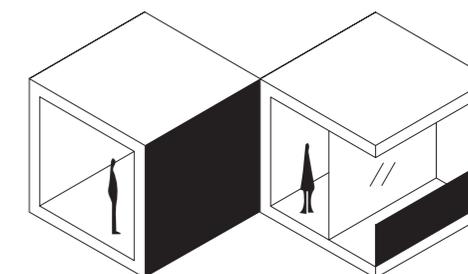
MFH SONNENPARKPLUS



Arento Architektur

Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2018
Wetzikon, CH

FORMA DI INTEGRAZIONE	CHIUSURA VERTICALE OPACA + PROTEZIONE
SUPERFICIE ATTIVA	280 m ² FACCIATA (+ 215 m ² COPERTURA)
INCLINAZIONE (ANGOLO DI TILT)	90°
ORIENTAMENTO (ANGOLO AZIMUTALE)	OVEST (FACCIATA) SUD (BALAUSTRE)
SISTEMA TECNOLOGICO	FACCIATA VENTILATA



INTEGRAZIONE

PRODUTTORE	ERTEX SOLAR
TECNOLOGIA PV	FOTOVOLTAICO MONOCRISTALLINO
MODULO PV	MODULO FOTOVOLTAICO VETRO-VETRO
CARATTERISTICA VISIVA	MIMETICO (FACCIATA) TECNOLOGIA VISIBILE (BALAUSTRE)
TRASPARENZA	OPACO
TRATTAMENTO COLORE	PELLICOLA SCURA SUL RETRO (FACCIATA) NESSUNO (BALAUSTRE)
POTENZA NOMINALE	150 Wp/m ² (FACCIATA) 150 Wp/m ² (BALAUSTRE)
EFFICIENZA MODULO	-



MODULO PV

PRODUZIONE ENERGETICA	23173 kWh/yr FACCIATA (+ 45426 COPERTURA)
POTENZA NOMINALE	36,1 kWp FACCIATA + (44,6 kWp COPERTURA)
AUTOCONSUMO	 100%

+39%

ENERGIA

2.6 **APPROFONDIMENTI**

2.6.1 **Tecnologia fotovoltaica: prima, seconda e terza generazione**

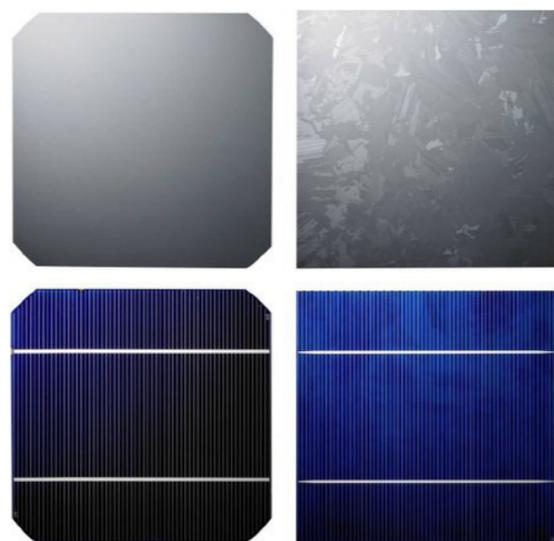
Per fornire una documentazione più dettagliata circa il *Building Integrated Photovoltaics* è necessario esplorare, seppur in maniera non esaustiva, i caratteri della materia stessa del BIPV, ovvero il fotovoltaico nelle sue differenti forme.

Quando si parla di materiale fotovoltaico, la principale distinzione che influenza la tipologia, l'aspetto, l'efficienza di tale fotovoltaico riguarda la generazione a cui appartiene, distinguendosi in tal modo in fotovoltaico di prima, di seconda o di terza generazione; questa classificazione dipende generalmente dalla natura del materiale semiconduttore adottato.

Prima generazione

Il fotovoltaico di prima generazione utilizza come materiale semiconduttore il silicio cristallino, *c-Si*, si distingue in fotovoltaico monocristallino e policristallino e ricopre il 95% della produzione fotovoltaica mondiale (IRENA 2019). Le celle solari del fotovoltaico monocristallino, *mc-Si*, sono ottenute da un silicio cristallino più puro rispetto quelle del policristallino, *pc-Si*, motivo per cui sotto le condizioni di test standard¹ (STC) raggiungono un'efficienza più elevata, 16-24%, ed i moduli PV a base di fotovoltaico monocristallino, con efficienze intorno al 20%, risultano pertanto più costosi. Le celle a base di silicio policristallino sono ottenute tramite processi di lavorazione più semplici, che implicano in tal modo una riduzione sia dei costi che dell'efficienza (14-18%) (Morini 2015)

Nonostante i valori di efficienza registrati dal fotovoltaico cristallino sotto condizioni di laboratorio siano più alti rispetto a quelli registrati dal fotovoltaico di altre generazioni, quello di prima generazione è maggiormente influenzato dalle condizioni operative dell'ambiente esterno, come la temperatura, l'angolo di incidenza dei raggi e la radiazione diretta: l'efficienza del fotovoltaico cristallino si riduce in modo significativo quando raggiunge elevate temperature per cui, a causa del surriscaldamento dei moduli PV che possono raggiungere 70-80°C quando irraggiati, sono necessari sistemi di raffreddamento retrostanti; anche l'angolo di incidenza influisce sulla resa dell'im-



(in alto)
Celle fotovoltaiche prima e dopo l'applicazione del rivestimento antiriflesso

Le celle monocristalline hanno gli angoli smussati, quelle policristalline hanno gli angoli retti. Nella prima riga le celle fotovoltaiche prima dell'applicazione dell'AR

(fonte: Fischer, Seacrist, Standley 2012)

1. Per le condizioni di test standard, o *Standard Test Conditions* (STC) si consulti il paragrafo *Definizioni e unità di misura* all'inizio del capitolo 2 *I caratteri del BIPV*

2. Si consulti la rappresentazione della resa dell'impianto PV in funzione di orientamento ed inclinazione fornita al paragrafo 2.1 *Un nuovo componente edilizio*, sottoparagrafo *Building Applied Photovoltaics*

pianto fotovoltaico a base di silicio cristallino², condizione dalla quale discende la comune tendenza ad applicare i moduli PV sui tetti inclinati; così come per gli angoli di incidenza meno favorevoli, anche la radiazione diffusa (dovuta per esempio a condizioni meteorologiche sfavorevoli), al posto di quella diretta, pregiudica parzialmente la resa dell'impianto.

Il processo di fabbricazione delle celle fotovoltaiche, sia esse monocristalline o policristalline, si basa sulla laminazione di un lingotto di silicio cristallino per ottenere delle lastre di spessore intorno allo 0,2 mm. La differente geometria dei lingotti di silicio monocristallino e policristallino dai quali vengono ottenute le lastre, dette *wafers*, rispettivamente cilindrica e parallelepipedica, determina la forma delle celle cristalline, rettangolari con ad angoli smussati per quelle monocristalline e rettangoli ad angoli retti per quelle policristalline, con dimensioni dai 100 ai 150 mm per lato. (Morini 2015) Per minimizzare la riflessione della radiazione solare, sul lato delle celle colpito dai raggi solari viene applicato un rivestimento antiriflesso (AR) ed è lo spessore di tale rivestimento che ne determina il tradizionale colore blu / nero³.

3. Variazioni di spessore del rivestimento antiriflesso determinano colorazioni differenti. Si consulti il paragrafo 2.6.3 *Approfondimenti. Caratteristiche formali*

Seconda generazione

La seconda generazione di fotovoltaico si riferisce comunemente alla tecnologia fotovoltaica a film sottile, *thin film*, volta a minimizzare la quantità di materiale semiconduttore utilizzato; questa caratteristica garantisce leggerezza, flessibilità, uniformità ai prodotti fotovoltaici. Il materiale semiconduttore utilizzato, infatti, viene depositato su un supporto (invece di rappresentare il supporto stesso come per il PV di prima generazione) e tale supporto può essere vetrato, metallico o plastico, permettendo pertanto soluzioni anche flessibili. (Morini 2015)

Rispetto al fotovoltaico di prima generazione, inoltre, quello a film sottile adotta materiali semiconduttori di diversa natura, distinguendosi principalmente in fotovoltaico a film sottile a base di silicio e fotovoltaico a film sottile non a base di silicio. Quando non viene adottato il silicio come materiale semiconduttore, ovvero nella sua forma amorfa, *a-Si*, o micromorfa, *μm-Si*, si entra nella famiglia del fotovoltaico a film sottile non a base di silicio, il cui materiale semiconduttore può essere il diseleniuro di indio rame gallio (CIGS) o il seleniuro di indio e rame (CIS), il telluro di cadmio (CdTe), la perovskite.

PV a film sottile a base di silicio

Nella famiglia del fotovoltaico a film sottile a base di silicio, il deposito di tale materiale raggiunge spessori micrometrici e costituisce quindi il film sottile che ne permette la legge-

rezza e la flessibilità. Tali caratteri, però, implicano una maggiore quantità di fotovoltaico a film sottile necessario per equiparare la produzione energetica del fotovoltaico cristallino, motivo per cui è da considerarsi ideale per grandi superfici. Altre caratteristiche del fotovoltaico a film sottile a base di silicio, accanto alla leggerezza e flessibilità di integrazione, sono l'aspetto uniforme garantito dalla deposizione del materiale semiconduttore e l'effetto di trasparenza ottenibile riducendo lo spessore dello stesso.

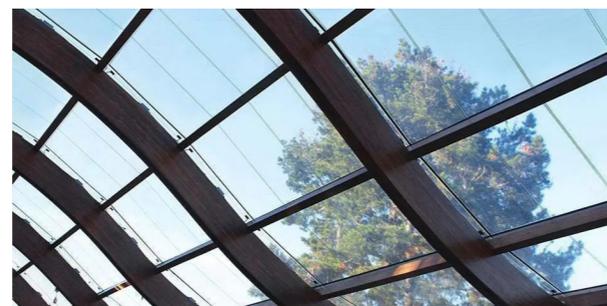
Sottoposto alle condizioni di test standard, però, il PV a base di silicio amorfo e quello a base di silicio micromorfo raggiungono rispettivamente il 4-6% ed il 10% ma, come già accennato, reagiscono meglio del fotovoltaico cristallino in condizioni di elevata temperatura, radiazione diffusa e angoli di incidenza non favorevoli. (Morini 2015)

A causa del calo del prezzo del silicio, accompagnato dal rispettivo calo del prezzo delle soluzioni *c-Si* più efficienti, dal 2012 il mercato del fotovoltaico si è gradualmente indirizzato verso la produzione della tecnologia cristallina, limitando così il mercato mondiale della tecnologia a film sottile alla quota del 5% nel 2019. (IRENA 2019)

PV a film sottile non a base di silicio

Nella famiglia del fotovoltaico a film sottile non a base di silicio, la perovskite è un minerale capace di assorbire un elevato quantita-

tivo di radiazione solare, per cui considerato un valido e promettente materiale per la tecnologia fotovoltaica; esperimenti in laboratorio condotti da ricercatori americani e coreani hanno rispettivamente registrato efficienze intorno al 24% ed al 27%. Uno dei principali ostacoli, però, che limitano il trasferimento di



Fotovoltaico a base di silicio amorfo in versione opaca (sopra) e trasparente (sotto)

a-Si opaco (fonte: <https://www.jakson.com/blog/amorphous-silicon-pv-modules-opens-up-new-possibilities-for-solar-power-generation/>)

a-Si trasparente (fonte: <https://www.onyxosolar.com/product-services/amorphous-pv-glass>)

tale materiale in un mercato solido e maturo è la sua debole durabilità in contesti umidi che implicherebbe la necessità di un suo incapsulamento.

Per quanto riguarda le celle fotovoltaiche CIGS (o CIS) e CdTe, entrambe le tecnologie raggiungono elevati valori di efficienza, rispettivamente il 22,9% ed il 21% ma, a causa della rarità dell'indio ed alla complessità del processo di produzione del CIGS, tale tecnologia non ha raggiunto un solido trasferimento nel mercato. Al contrario, il più semplice processo di produzione delle celle CdTe rende tale tecnologia la più diffusa nel mercato del fotovoltaico a film sottile. (IRENA 2019)



Fotovoltaico CIGS (fonte: <http://solopower.com/products/solopower-sp3/>)

Terza generazione

La prima e la seconda generazione di fotovoltaico coprono il 100% del mercato fotovoltaico globale, mentre una terza e più recente generazione, associata al concetto di tecnologia fotovoltaica a base organica, non si è ancora inserita nel mercato.

A questa categoria appartengono il fotovoltaico organico OPV (*Organic Photovoltaics*) e le celle solari di Grätzel DSSC (*Dye-Sensitized Solar Cell*) che contengono materie prime con composti organici. Come la seconda generazione, il fotovoltaico a base organica garantisce flessibilità, trasparenza e flessibilità ma gode, in più, di un processo di fabbricazione che attinge procedure note quali la serigrafia ed il getto di inchiostro dall'industria della stampa.

Le principali barriere al trasferimento di tali tecnologie sul mercato sono la durabilità nel tempo e l'efficienza, quest'ultima di circa il 12% per le celle OPV e il 15% per quelle DSSC (efficienza che scende ad un intervallo di 4-8% quando si passa da celle DSSC a moduli fotovoltaici DSSC).

Organic Photovoltaics OPV

Le celle solari OPV sono caratterizzate da una struttura a sandwich, all'interno della quale il materiale semiconduttore viene interposto tra uno strato trasparente, a sua volta rivestito da un film trasparente conduttore ed un supporto che funziona da controlettrodo. Oltre i caratteri precedentemente citati in merito alla

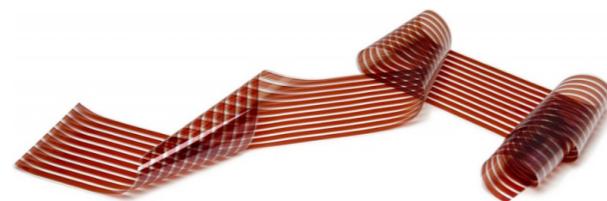
tecnologia fotovoltaica di terza generazione, altri vantaggi del fotovoltaico OPV sono il comportamento sotto condizioni di elevata temperatura che, a differenza delle precedenti generazioni, non viene compromesso ma viceversa registra una resa migliore e la trasparenza e la colorazione che non sono soggette a cali prestazionali, dal momento che è lo stesso materiale ad avere tali proprietà senza alcuna parziale rimozione dello strato attivo.

Dye-Sensitized Solar Cell DSSC

Rispetto alle OPV, le DSSC possono essere considerate più vicine alla fase di industrializzazione e sono parzialmente entrate nel mercato BIPV (Morini 2015).

Sono state inventate negli anni Novanta da Michael Grätzel e Brian O'Reagan all'école Polytechnique fédérale de Lausanne e sono particolari celle fotoelettrochimiche costituite da due vetri conduttori che fungono da elettrodi e sono separati da uno strato di biossido di titanio (TiO_2), dallo strato attivo e dalla soluzione elettrolitica; tale strato attivo è costituito da un colorante che trasferisce elettroni al biossido di titanio in seguito all'assorbimento di fotoni.

Nonostante il basso livello di efficienza, la resa delle DSSC risulta migliore sotto condizioni di radiazione solare diffusa rispetto a quella diretta, per cui tale tecnologia risulta vantaggiosa per le esposizioni meno favorevoli (Morini 2015).



Fotovoltaico di terza generazione, Organic Photovoltaics (sopra) e Dye-Sensitized Solar Cell (sotto)

OPV (fonte: https://www.cheetah-exchange.eu/pv_technologies.asp?i=6)

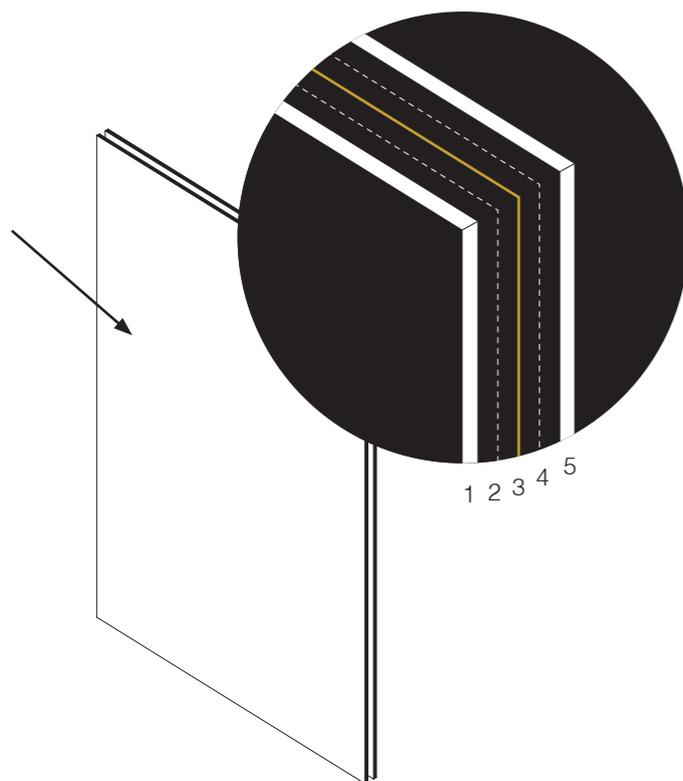
DSSC (fonte: <https://www.pv-magazine.com/2020/12/11/semi-transparent-dye-sensitized-solar-module-with-8-7-efficiency/>)

2.6.2

Stratigrafia dei moduli BIPV

Perché possano sostituire uno o più componenti edilizi e garantire una o più funzioni indicate nella EN 50583, le soluzioni BIPV sono costituite da una struttura vetrata stratificata al cui interno viene posizionato il materiale fotovoltaico (silicio mono-cristallino, silicio poli-cristallino, silicio amorfo, seleniuro di rame indio gallio, tellururo di cadmio).

Dalla diversa combinazione dei componenti della stratigrafia è possibile tracciare una prima classificazione delle soluzioni BIPV in moduli PV vetro-vetro, moduli PV vetro-film, moduli PV vetri laminati a tre strati, moduli PV isolati termicamente. (Oder-sun 2011)



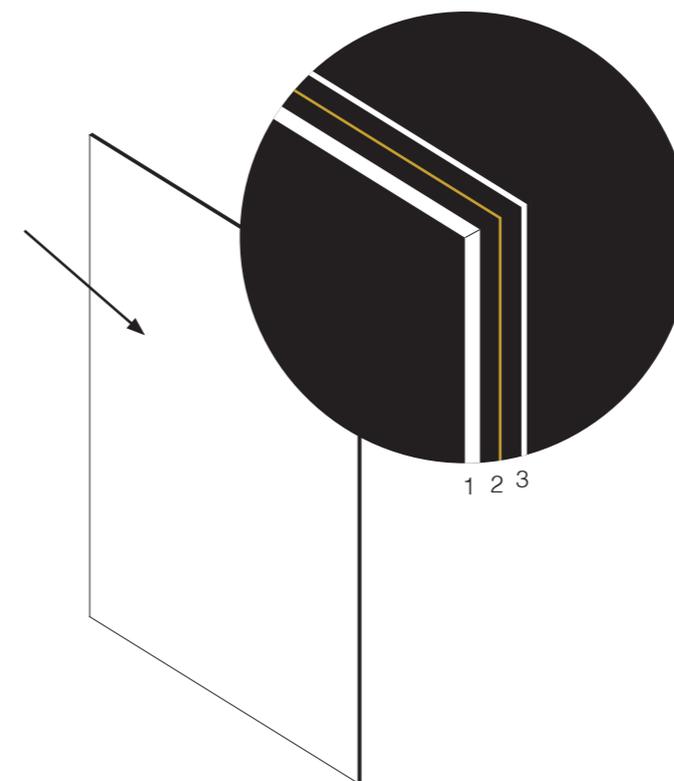
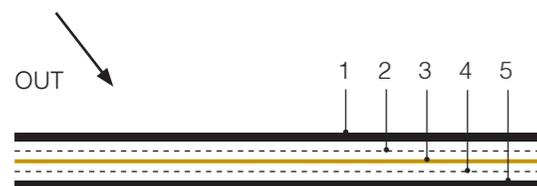
Modulo fotovoltaico vetro-vetro

I moduli fotovoltaici vetro-vetro possono essere integrati in copertura come in facciata e rappresentano la categoria di prodotti BIPV più diffusa.

Sono costituiti da due lastre vetrate all'interno delle quali due film sottili polimerici racchiudono il materiale fotovoltaico (di prima, seconda o terza generazione), per una stratigrafia complessiva composta da:

- 1 / **lastra vetrata anteriore**
- 2 / **film sottile polimerico**
- 3 / **fotovoltaico**
- 4 / **film sottile polimerico**
- 5 / **lastra vetrata posteriore**

Il materiale polimerico che contiene il fotovoltaico è necessario per il processo di laminazione del vetro e, di conseguenza, per ottenere un vetro stratificato di sicurezza obbligatorio per l'integrazione in facciata ed in copertura. I materiali polimerici più diffusi sono l'etilene vinil acetato (EVA) ed il polivinilbutirale (PVB). (Pelle *et al.*, 2020)



Modulo fotovoltaico vetro-film

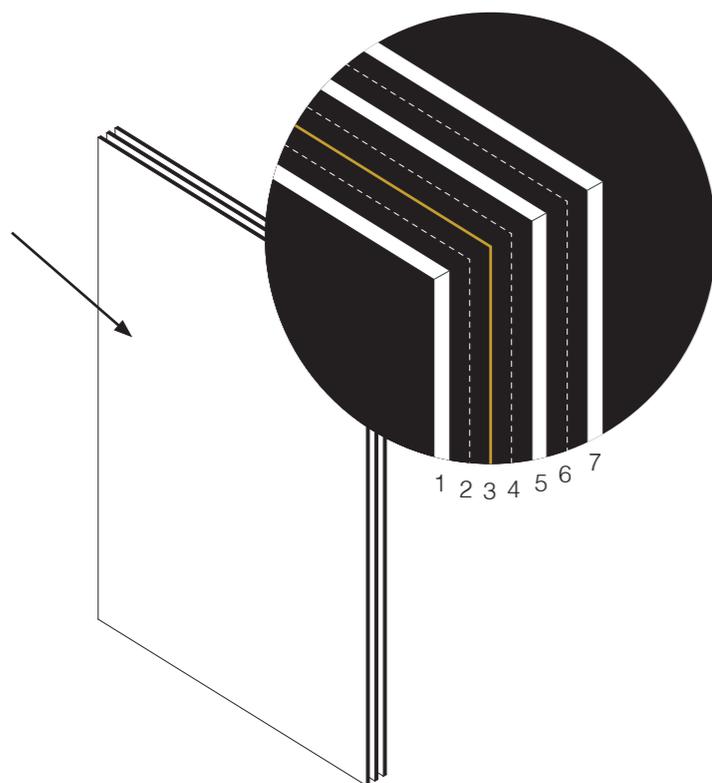
I moduli fotovoltaici vetro-film combinano una lastra vetrata frontale ed uno strato sottile metallico o polimerico tra i quali viene racchiuso il materiale fotovoltaico (di prima, seconda o terza generazione), per una stratigrafia complessiva composta da:

- 1 / **lastra vetrata**
- 2 / **fotovoltaico**
- 3 / **backsheet metallico / polimerico**

I moduli vetro-film sono disponibili come moduli fotovoltaici standard ed hanno il vantaggio di essere decisamente più leggeri dei moduli BIPV vetro-vetro per l'utilizzo di una sola lastra vetrata solitamente più sottile.

Perché possano essere integrati, infatti, il vetro frontale dei moduli deve essere temperato e lo spessore conforme ai requisiti normativi. (Odersun 2011)



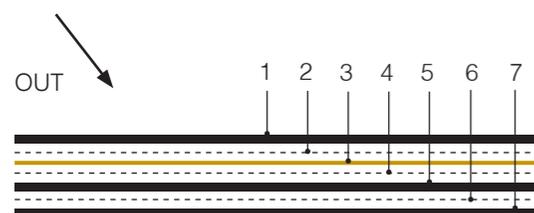


Modulo fotovoltaico laminato a tre strati

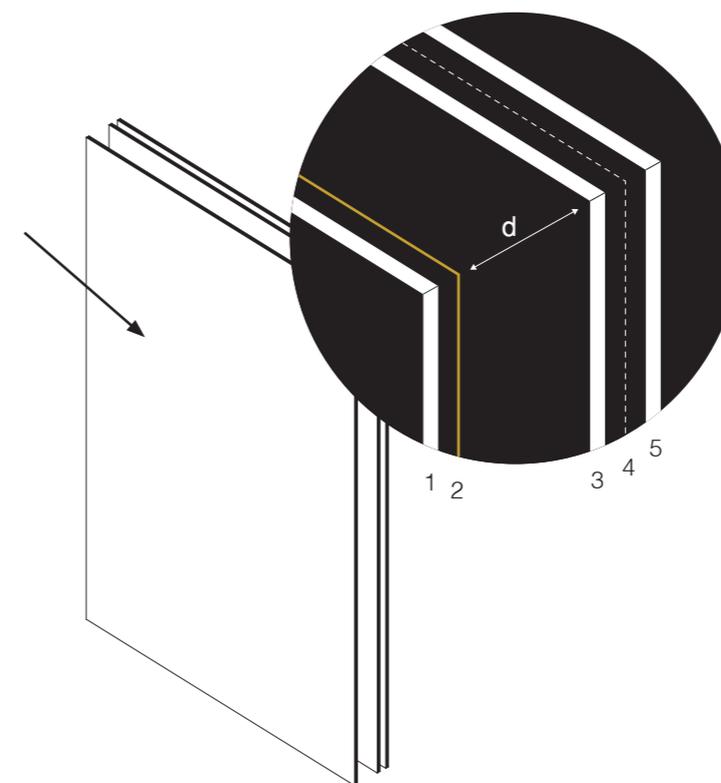
Un'ulteriore possibilità per l'integrazione BIPV consiste in moduli fotovoltaici a tre strati vetrati, la cui stratigrafia segue quella precedente del modulo vetro-vetro ma aggiunge una lastra vetrata.

Complessivamente:

- 1 / **lastra vetrata anteriore**
- 2 / **film sottile polimerico**
- 3 / **fotovoltaico**
- 4 / **film sottile polimerico**
- 5 / **lastra vetrata intermedia**
- 6 / **film sottile polimerico**
- 7 / **lastra vetrata posteriore**



Qualora vengano rispettati tutti i requisiti normativi, tale soluzione può essere impiegata come vetro calpestabile. (Odersun 2011)

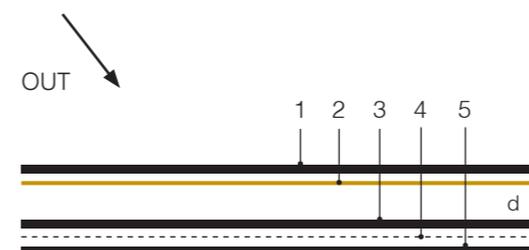


Modulo fotovoltaico isolato

Per integrare i moduli BIPV come componenti di chiusura trasparente per ambienti riscaldati, è necessario che i moduli fotovoltaici siano termicamente isolanti. A tale scopo, nei moduli PV vetro-vetro vengono inclusi dei distanziatori che permettono di mantenere una distanza fissa tra le lastre vetrate in cui l'aria ferma funge da isolante termico. (Odersun 2011)

Complessivamente:

- 1 / **lastra vetrata anteriore**
- 2 / **fotovoltaico**
- d / distanziatore
- 3 / **lastra vetrata intermedia**
- 3 / **film sottile polimerico**
- 4 / **lastra vetrata posteriore**



1. Per approfondire si guardi il paragrafo 2.4 *Evoluzione del BIPV*

(a seguire)

Caratteristiche visive dei prodotti BIPV. Panoramica dei trattamenti di colorazione adottati.

Una prima classificazione distingue prodotti BIPV in opachi e semitrasparenti (o trasparenti).

Le categorie incolonnate evidenziano gli elementi sui quali si interviene per modificare l'aspetto finale del PV.

Per ogni trattamento è indicata la tecnologia fotovoltaica compatibile (es. c-Si) e la visibilità della stessa.

(Elaborazione propria)

2.6.3 Caratteristiche formali

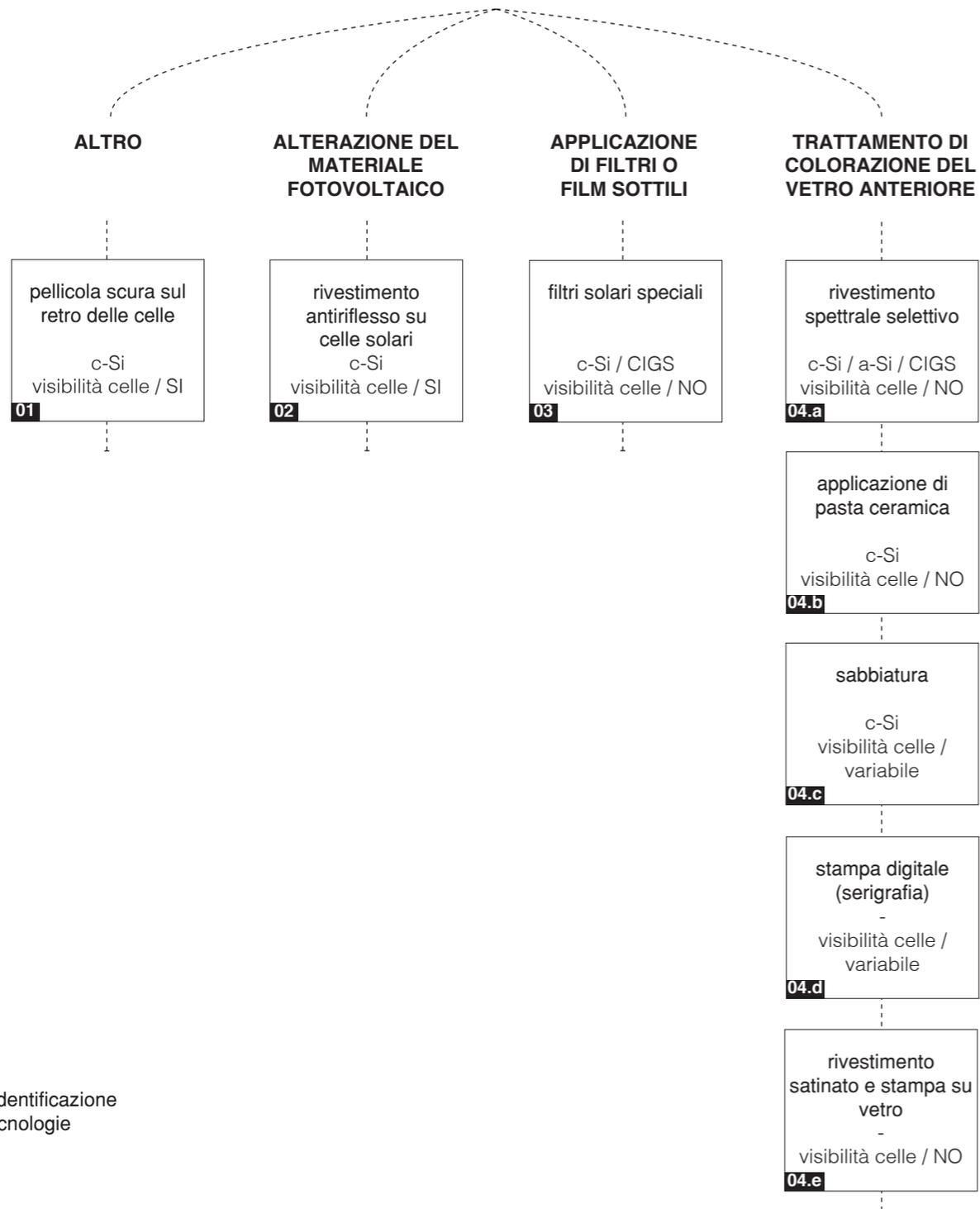
La traiettoria seguita dal processo di innovazione del BIPV è senza dubbio la possibilità di rendere irriconoscibile l'impianto fotovoltaico integrato nell'edificio, al fine di favorirne l'accettazione nel progetto di architettura¹. Se negli anni passati il costo aggiuntivo del BIPV veniva motivato dal messaggio di sostenibilità e responsabilità che l'immagine di quell'architettura trasmetteva, oggi questa motivazione sta cambiando: si punta a realizzare prodotti BIPV *mimetici*, in modo che non sia più riconoscibile la differenza tra i materiali tradizionali ed i componenti impiantistici (SUPSI 2017).

I maggiori sforzi compiuti dalla ricerca e dall'industria sono indirizzati, quindi, verso l'aspetto finale e le caratteristiche visive dei prodotti BIPV, sperimentando nuove tecnologiche capaci al tempo stesso di valorizzare la finitura esterna dei moduli con innovativi trattamenti di colorazione garantendo comunque valori di efficienza energetica competitivi.

Data l'incidenza che l'aspetto finale dei prodotti fotovoltaici sta acquistando negli anni recenti in termini di ricerca, sperimentazione e produzione, **il paragrafo seguente vuole fornire una panoramica delle principali tecniche attraverso le quali è possibile agire sulle caratteristiche visive dei prodotti, classificando prima le soluzioni in opache e trasparenti e distinguendo successivamente ciascun tipo di tecnologia adottata.**

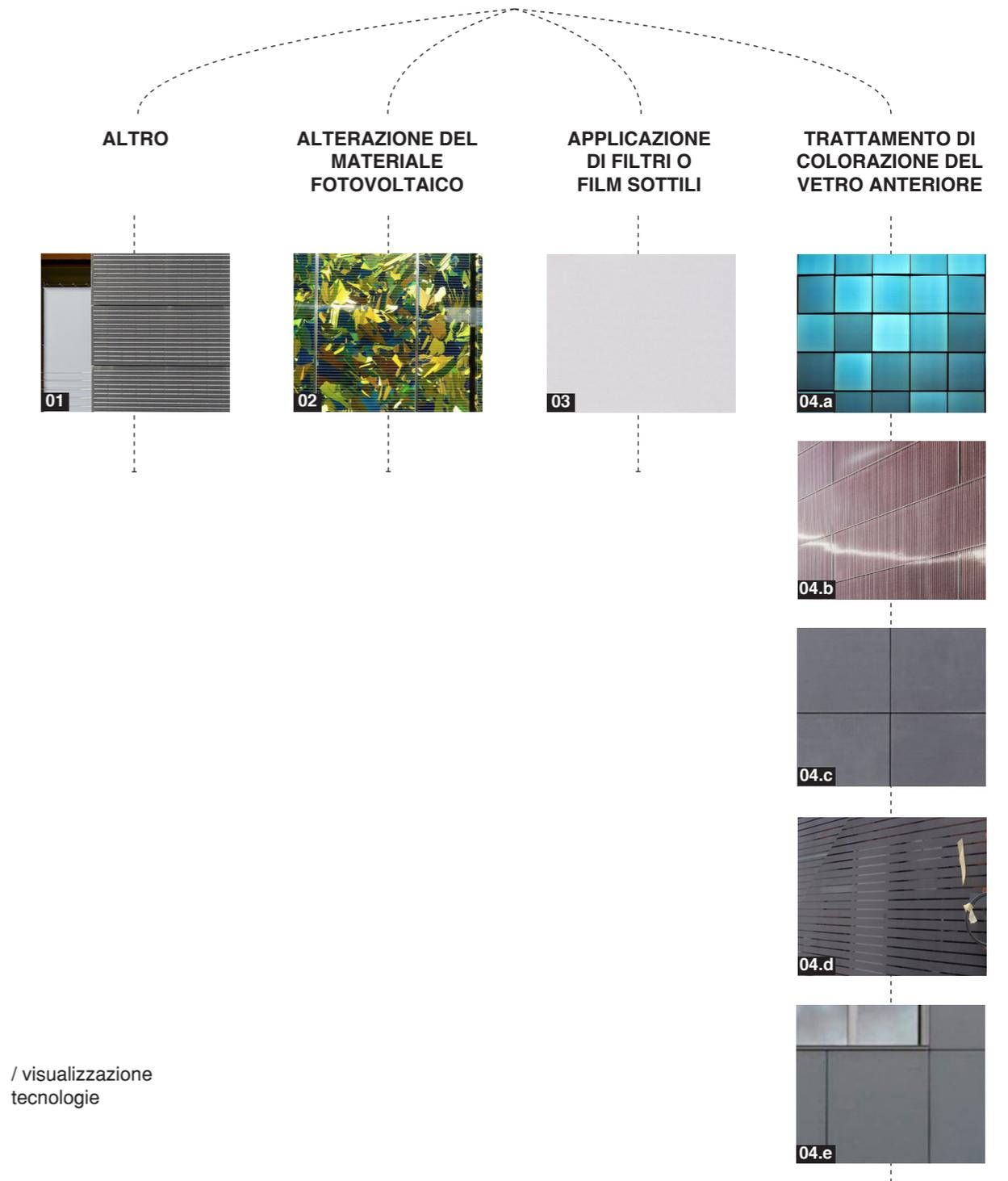
Soluzioni opache

TECNOLOGIE DI COLORAZIONE



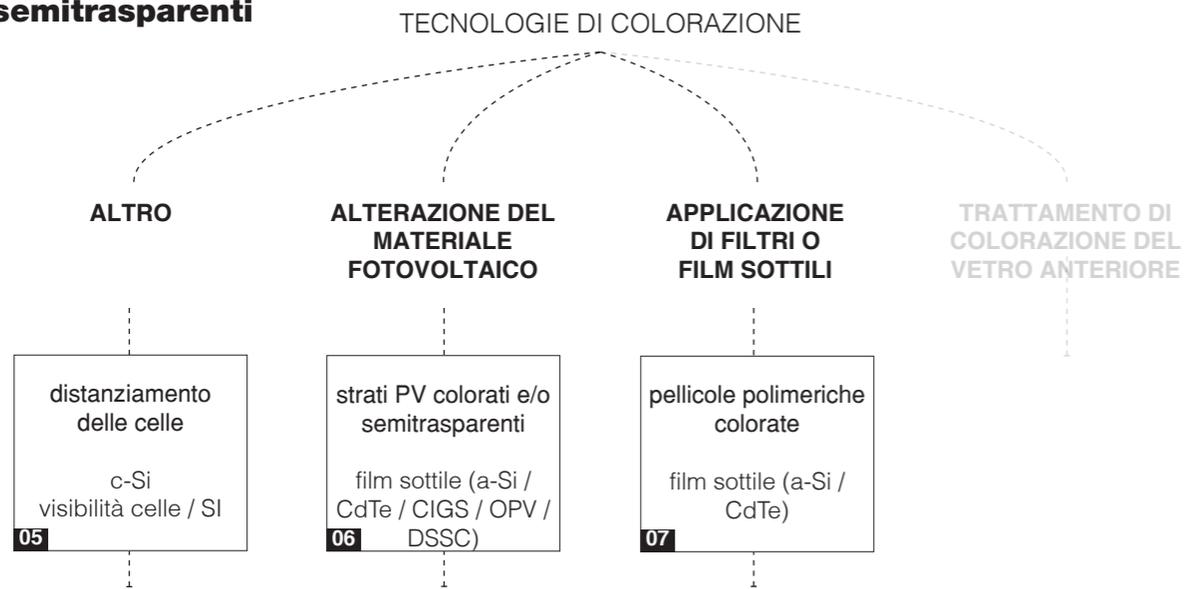
/ identificazione tecnologie

TECNOLOGIE DI COLORAZIONE

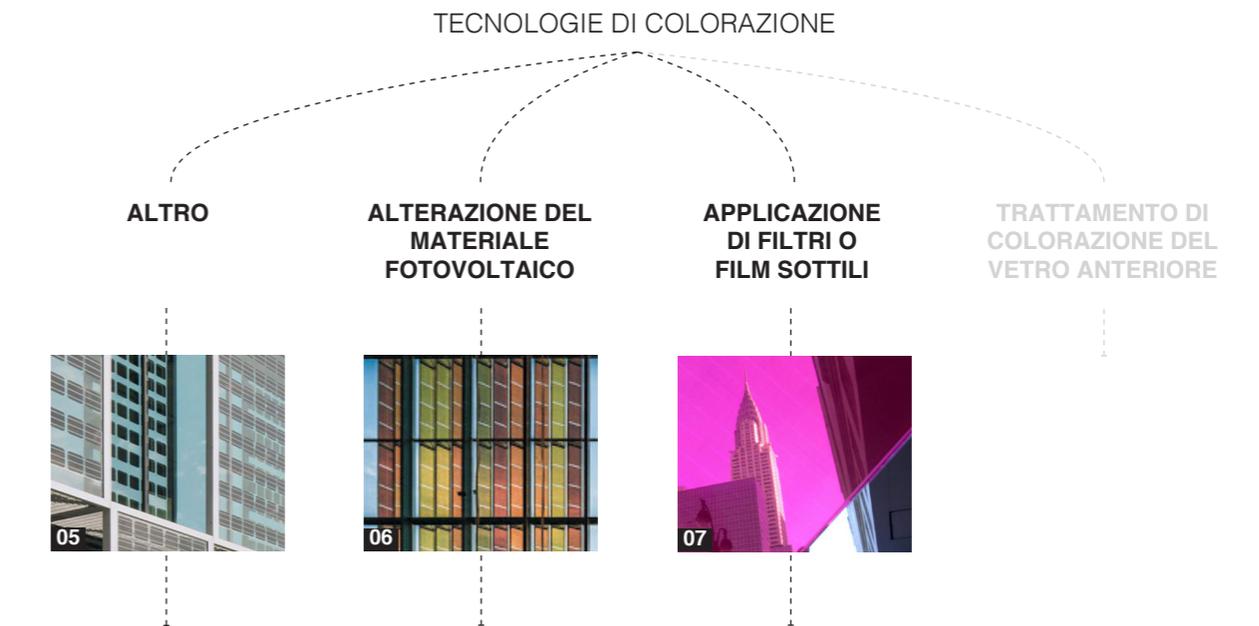


/ visualizzazione tecnologie

Soluzioni semitrasparenti



/ identificazione tecnologie



/ visualizzazione tecnologie

Soluzioni opache

01

Pellicola scura sul retro delle celle

Per garantire una finitura più uniforme al fotovoltaico cristallino (c-Si), caratteristico per il suo tradizionale aspetto a quadri, **è possibile applicare una pellicola scura sul retro delle celle.** Questa tecnica consente di *mascherare* le celle fotovoltaiche quando osservate da lontano, rendendole riconoscibili solo ad un'analisi ravvicinata. Agendo sul retro delle celle, il PV non registra cali di prestazione².

▶ ALTRO

/ identificazione tecnologie

02

Rivestimento antiriflesso su celle solari

Le celle PV monocristalline e policristalline prevedono sulla superficie una pellicola antiriflesso (AR) di uno spessore definito al fine di massimizzare l'efficienza energetica; la pellicola AR determina la tipica colorazione blu/nero delle celle PV standard. **Modificando lo spessore dell'AR è possibile ottenere colorazioni differenti,** con conseguenze sulle prestazioni energetiche. (PVPS T15-07 2019)

▶ ALTERAZIONE DEL MATERIALE FOTOVOLTAICO

². Si guardi la definizione di "Rendimento" al paragrafo *Definizioni ed unità di misura* all'inizio del capitolo 2 *I caratteri del BIPV*

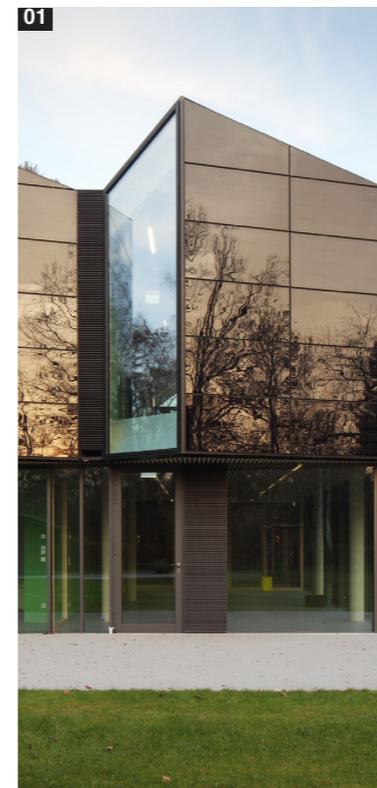
03

Filtri solari speciali

Il centro di ricerca CSEM ha sviluppato una nuova tecnologia fotovoltaica commercializzata da Solaxess. **Un filtro selettivo** applicato su vetro anteriore dei moduli PV **riflette la radiazione solare dello spettro visibile**, determinando in questo modo un aspetto bianco, **mentre viene assorbita e convertita in elettricità la radiazione infrarossa.** In tal modo, si registra una riduzione di efficienza di circa il 40% rispetto ai moduli tradizionali, a vantaggio di una tecnologia mimetica. (PVPS T15-07 2019)

▶ APPLICAZIONE DI FILTRI O FILM SOTTILI

01



02



03



/ visualizzazione tecnologie

Soluzioni opache

04.a

Rivestimento spettrale selettivo

Sviluppata dall'EPFL e da SwissINSO, la tecnologia Kromatix permette di nascondere le celle PV senza adottare pigmenti o vernici colorate, garantendo così un calo prestazionale ridotto. Un rivestimento multistrato viene depositato sulla superficie interna del vetro anteriore con processi di deposizione atomica, garantendo un'alta trasmissione solare, minimo assorbimento e determinando il colore. Il trattamento della superficie esterna del vetro anteriore, invece, provoca una riflessione diffusa riducendo l'effetto di abbagliamento. (SwissINSO)

▶ TRATTAMENTO DI COLORAZIONE DEL VETRO ANTERIORE

/ identificazione tecnologie

04.b

Applicazione di pasta ceramica

Una pasta ceramica viene applicata al vetro anteriore prima del processo di tempra dello stesso, in modo tale da far legare profondamente la pasta ceramica al vetro. Stampando un motivo a punti, si ottengono sufficienti aree libere attraverso cui la radiazione solare può intercettare le celle PV. L'Università di Scienze Applicate di Lucerna ha sviluppato un metodo di stampa ceramica in cui non risultano perdite superiori al 20%, nonostante l'uso di colori differenti. (PVPS T15-07 2019)

▶ TRATTAMENTO DI COLORAZIONE DEL VETRO ANTERIORE

04.c

Sabbiatura

Sulla superficie esterna del vetro anteriore del modulo PV viene spruzzata sabbia ad alta velocità, determinando un colore bianco latte. Successivi trattamenti di colorazione permettono di modificare ulteriormente la finitura esterna, come avviene per i moduli PV sviluppati da SolarGlasLabor. (PVPS T15-07 2019)

▶ TRATTAMENTO DI COLORAZIONE DEL VETRO ANTERIORE



/ visualizzazione tecnologie

Soluzioni opache

04.d

Stampa digitale (serigrafia)

Un inchiostro speciale viene stampato sulla superficie esterna del vetro anteriore dei moduli PV, ottenendo disegni ed immagini desiderati. (PVPS T15-07 2019)

▶ TRATTAMENTO DI
COLORAZIONE DEL
VETRO ANTERIORE

/ identificazione
tecnologie

04.e

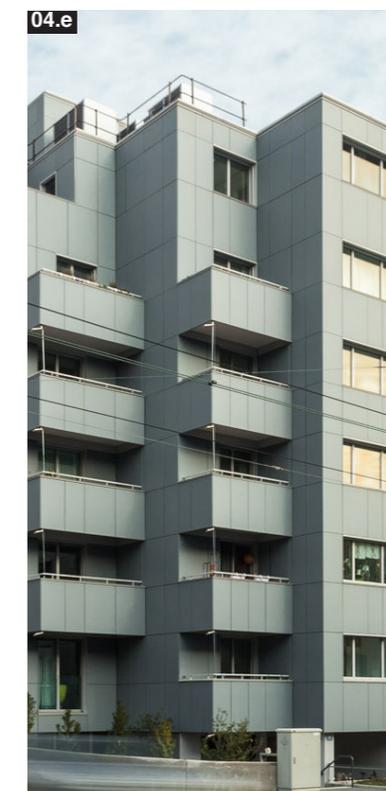
Rivestimento satinato e stampa su vetro

La finitura satinata sulla superficie esterna del vetro anteriore del PV è talvolta combinata con una serigrafia, o stampa digitale, sulla superficie interna dello stesso. Questa tecnica causa una riduzione della trasparenza del vetro a favore di una maggiore opacità e colorazione. (PVPS T15-07 2019)

▶ TRATTAMENTO DI
COLORAZIONE DEL
VETRO ANTERIORE



/ visualizzazione
tecnologie



Soluzioni semitrasparenti

05

Distanziamento delle celle

Per permettere alla radiazione solare di filtrare e raggiungere gli ambienti interni di un edificio adottando la tecnologia fotovoltaica cristallina (c-Si), si procede aumentando la distanza tra le celle PV. Questa tecnica non determina cali prestazionali delle singole celle PV, ma implica un numero minore di celle integrabili in un modulo PV, riducendo quindi la potenza nominale dello stesso³. L'effetto finale è una soluzione semitrasparente le cui celle PV possono fungere da elementi schermanti alla radiazione solare.

▶ ALTRO

/ identificazione tecnologie

06

Strati PV colorati e/o semitrasparenti

Adottando tecnologie fotovoltaiche a film sottile, come il silicio amorfo (a-Si), il tellururo di cadmio (CdTe), il seleniuro di rame indio gallio (CIGS), celle solari a base organica (OPV), celle solari sensibilizzate a coloranti (DSSC), è possibile ottenere differenti gradi di trasparenza attraverso trattamenti laser che rimuovono parzialmente lo strato attivo dei moduli. Una semitrasparenza del 40% provoca una riduzione dell'efficienza del modulo di circa il 45-50%, per cui queste soluzioni sono indicate per superfici vetrate molto estese. (PVPS T15-07 2019)

▶ ALTERAZIONE DEL MATERIALE FOTOVOLTAICO

3. Si guardi la definizione di "Watt di picco" al paragrafo *Definizioni ed unità di misura* all'inizio del capitolo 2 *I caratteri del BIPV*

4. Il PVB è il film sottile polimerico incapsulante necessario per la produzione dei moduli PV. Per approfondire, si guardi il paragrafo 2.6.2 *Approfondimento. Stratigrafia dei moduli BIPV*

07

Pellicole polimeriche colorate

La tecnologia al silicio amorfo (a-Si) può essere combinata ad uno strato polivinilbutirrale PVB colorato⁴. Poiché l'incapsulante colorato si trova sul retro dello strato PV a film sottile, non ci sono cali prestazionali dovuti alla colorazione. Tra i principali produttori di soluzioni PV che adottano questa tecnologia, va citato Onyx Solar. (PVPS T15-07 2019)

▶ APPLICAZIONE DI FILTRI O FILM SOTTILI



/ visualizzazione tecnologie

Iconografia

01_+e Kita, Opus Architekten BDA, Marburg, DE

<https://www.archdaily.com/641051/nursery-e-in-marburg-opus-architekten>

02_ Kingsgate House, HCL Architects, Londra, UK

<http://www.hcla.co.uk/projects/type/kingsgate-house>

03_ Edificio realizzato con la tecnologia sviluppata da CSEM e commercializzata da Solaxess

<https://www.solaxess.ch/en/home/>

04.a_ CIS Nordhavn, CF Moller Architects, Copenhagen, DK

www.cfmoller.com

04.b_ Palazzo Solaris, Huggenbergerfries Architekten, Zurigo, CH

<https://www.lamberts.info/en/project/solaris/>

04.c_ Edificio a Brütten, René Schmid, CH

<https://reneschmid.ch/projekte/mehrfamilienhaeuser/detail/erstes-energieautarkes-mehrfamilienhaus-bruetten>

04.d_ Condominio Chrüz matt, Mark Rösli, Aesch, CH

<https://www.ee-news.ch/de/article/32992/ernst-schweizer-symbiose-von-holz-und-photovoltaikfassade>

04.e_ Condominio Hofwiesenstrasse, Viriden+Partner Architektur, Zurigo, CH

<https://apting.ch/referenz/mfh-hofwiesenstrasse-22-zuerich>

05_ Sede AGC Glass Europe Technovation Centre, Assar Architects, Gosselies, BE, <https://www.assar.com/en/projects/agc-technovation-center>

06_ SwissTech Convention Centre (EPFL), Losanna, CH

<http://energiein.e-monsite.com/medias/images/08fcc44f4247c328d3b8b19d4050b3994cf5b6c3.jpg>

07_ Facciata Soltech del garage per auto elettriche nel quartiere Vallastaden, Linköping, SE

<https://soltechenergy.com/vara-produkter/soltech-facade/>

3.1 Un ponte tra teoria e pratica

con Enrico Ferramondo Marchesi, *innovation manager* del *living lab* NEST di Zurigo

3.2 *SolAce*: ricerca, produzione e architettura

con Pietro Florio, responsabile del progetto di ricerca scientifica dell'Unità di gestione del rischio catastrofi del JRC. Ricercatore presso l'EPFL

3.3 Questione di approcci

con Pierluigi Bonomo, responsabile del BIPV Advanced Building Skin Team della SUPSI

3.4 Tasselli mancanti per l'Italia

con Alessandro Virtuani, ricercatore senior e responsabile del gruppo Moduli e Affidabilità presso l'EPFL e co-fondatore della start-up Officina del Sole (O'Sole)

3

/ Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione

Il lavoro di tesi porta ad intravedere il BIPV come uno strumento valido per indirizzare in parte il settore delle costruzioni verso un processo di decarbonizzazione, senza influire negativamente sul progetto di architettura ma, al contrario, valorizzarlo.

*La concentrazione dei maggiori casi studio in contesti molto specifici, come alcune località svizzere e tedesche, ha infatti suggerito di andare oltre le evidenti potenzialità formali che ne permettono l'integrazione compositiva: **perché la diffusione è specifica e relativa a contesti ben precisi? Quali sono quei modelli adottati, capaci di ottenere tali risultati? Quali sono i percorsi che hanno generato questi progetti?***

*Sono queste le domande che hanno accompagnato la ricerca e che hanno gradualmente portato a supporre che il BIPV, oltre ad essere un evidente prodotto innovativo, comporti anche un approccio innovativo. **Il fotovoltaico integrato è sicuramente un nuovo materiale da costruzione disponibile in commercio, è un prodotto industriale, ma può anche essere un sistema che in alcuni contesti sta implicando un approccio collaborativo ed interdisciplinare, delineando un nuovo modello di innovazione?***

I confronti organizzati con figure inserite nel campo dell'innovazione tecnologica, in alcuni casi centrali al processo evolutivo del BIPV, in altri casi inseriti in maniera più trasversale, rappresentano un valido strumento di confronto per costruire da un lato un quadro di verifica sui temi individuati e dall'altro un punto di partenza strutturato per la progettazione della soluzione BIPV brevettabile nell'ambito dell'attività "Facade Design in Building Integrated Photovoltaics".

La precedente analisi dello dell'arte del BIPV ha individuato un modello organizzativo in cui non sono le linee guida a dettare le regole del BIPV, ma una visione d'insieme in cui la ricerca, il sistema imprese ed i professionisti sono legati da obiettivi di mercato a breve termi-

ne per generare un mercato edilizio più solido e capace di investire nell'innovazione tecnologica. La ricerca applicata non sperimenta più solo con prototipi, ma instaura un rapporto di tipo collaborativo con le aziende, talvolta giungendo alla produzione di nuove soluzioni che rappresentano il frutto della condivisione dei rispettivi know-how. È in questo intreccio sinergico che si inserisce **l'architetto con il fondamentale ruolo di sperimentatore, l'unica figura capace di trasformare quella tecnologia così avanzata nelle immagini e nelle emozioni trasmesse dall'architettura**. Il gap tra la tecnologia e l'architettura, quindi, può essere superato solo dall'architetto, che in questa elaborata trama rappresenta una figura essenziale per il trasferimento tecnologico e la definizione di un modello di innovazione sinergico.

Sono queste le premesse con cui sono stati avviati i momenti di confronto riportati di seguito, dai quali è emersa una lettura che, seppur specifica di un campo di analisi ristretto e relativo al presente lavoro di tesi, è risultata abbastanza coerente con il reale contesto del BIPV. Si è parlato di un'innovazione che, se da un lato parte dalle condizioni favorevoli permesse da specifici programmi politici come quello svizzero, è prima di tutto il frutto di una **volontà di cambiamento e rivoluzione del modo lavorare, operare ed immaginare**.

3.1 UN PONTE TRA TEORIA E PRATICA

con **Enrico Ferramondo Marchesi**
innovation manager del living lab NEST di Zurigo

2.11.2020

Enrico Ferramondo Marchesi lavora presso il *living lab* NEST degli istituti di ricerca Empa ed Eawag a Zurigo dove copre il ruolo di *innovation manager* e si occupa delle relazioni di collaborazione tra la ricerca e le imprese. Ha conseguito la laurea in ingegneria meccanica presso l'ETH di Zurigo per continuare gli studi in California, con un master in Tecnologia e politica dei trasporti alla UC Davis.



intervista **Eleonora Merolla**
2.11.2020

This BIPV holistic vision that includes research, business system, architects and engineers is an approach that could redesign the role of architectural design in identifying and testing solutions and strategies for achieving climate neutrality goals at the heart of the European challenge. The NEST platform of Empa and Eawag research centers would seem to represent the bridge between research and production able to develop new models of innovation through technology transfer actions for market diffusion.

_ If the hypothesis put forward by my thesis work is correct, is this strategy and the NEST model the result of policies and objectives that Switzerland has set itself in the last decade, ahead of Europe, and which has been reflected in a new model of applied research to support the market and business?

MARCHESI / *The process is reversed. **NEST is not the result of policies or actions taken by Switzerland, but, we hope, is influencing them.** It is not the result. The lack of a bridge between research and production was identified, particularly for technologies related to the building sector or materials, and consequently the need for it was identified. Now NEST is starting to have an influence in research and policy in other countries as well, for example Germany is thinking about designing its own NEST.*

_ Are there other realities comparable to that of NEST, which promote the transfer of innovative products in the market by creating a dynamic environment that interconnects researchers, manufacturers and professionals?

MARCHESI / *There is still nothing comparable to NEST anywhere in the world, not just in Europe.*

_ In these three years since the inauguration of NEST the new technologies tested (and in particular the BIPV technologies) have had an impact on the market? The goal of NEST is to speed up the transfer of innovative products within the market, is this transition happening in the Swiss and/or international market?

MARCHESI / *Actually not yet and this is a matter of time. The construction industry is really very slow so it's just too early for us to see any results. This is definitely the main reason. There are few examples that are not very relevant. The PV field is so large that it is only too early to be able to record results in terms of products.*

What we see is an impact on people's opinion and skills, people are starting to find out about NEST and come to visit, so **we see that NEST is highlighting topics that are interesting for people** such as circular economy, photovoltaic, energy system). So it is in this sense that something starts to move even if slowly. At the moment it is impossible to predict how much time the market will need to absorb these innovations because for example some topics are huge and can take decades to see results and impacts.

_ In this innovation-oriented reality of the construction sector, what role can **architects** play? Will they be able to play the role of experimenters of new technologies? Will they be able to make a contribution in the framework, for example in the framework of NEST research, to promote an increasing integration of technologies in architecture? Or, on the contrary, will they be marginal figures with respect to ongoing innovation processes?

MARCHESI / *I think architects have to take on a different responsibility than before. Before, the architect's role or areas of expertise were those related to design in terms of spatiality, clearly they were tasked with solving problems and issues to make the building work but it was in terms of spatiality. It was the engineers who took over later to make it work. **But today we have a lot of challenges and requirements to meet** (energetically, materials, sustainability, user needs) **and we can also rely on more advanced technology to achieve those goals. So right from the initial stages of a project, a figure capable of linking these aspects is needed.** He should not only know how to design beautiful buildings, but it's the architects who need to have knowledge of these technologies from the very beginning of the design process. So for example in the realization of these units it is the responsibility of the architects to deal with these technological aspects.*

_ Is NEST a platform where new products born from the collaboration between research and industry are tested or is it also the place where these collaborations are created? How is the **collaboration** between research, industry and professionals developed? Is it the research that already identifies possible industries and professionals before proposing a technological solution to test? Or is there a specialized team that chooses who to involve?

MARCHESI / *It's always individual and each time it's a different case. There are people at NEST like me, who are innovation managers and **we try to build this stage where others are operating.** it is really important to know that the research, the developments, the prototypes are not done by NEST. We just try to run the show. We try to identify topics, we try to identify partners, sometimes we bring them together. **That is the major part of my job, to make this thing happen, to make NEST work** But there's no one-size-fits-all process, the processes are all different for each unit, there are no set rules. We don't choose who to involve in projects, at most we help choose. For example, if the Turin Polytechnic develops a new technology that it would like to test in NEST but needs an industrial partner, it is up to it to find one. At the most we can support/assist in this choice, maybe we can know someone to put in contact, but we are not the ones to choose. It's your business. Let's pretend instead that you have a small system to test (for example a heat exchanger) that can be inserted in a unit, in that case you don't need to build a separate unit but just add it in a unit already present in NEST.*

3.2 **SOLACE: ricerca, produzione e architettura**

con Pietro Florio

Responsabile del progetto di ricerca scientifica dell'Unità di gestione del rischio catastrofi del JRC. Ricercatore presso l'EPFL

3.11.2020

Pietro Florio è attualmente responsabile del progetto di ricerca scientifica dell'Unità di gestione del rischio catastrofi del JRC, il Centro comune di ricerca di Ispra della Commissione Europea. Ha completato la sua formazione accademica presso l'EPFL dove ha conseguito un dottorato di ricerca sull'impatto visivo dei sistemi solari nei contesti urbani di valenza storica.



intervista **Eleonora Merolla**
3.11.2020

_ SolAce è l'unità che il vostro gruppo di ricerca LESO-PB ha progettato per la piattaforma NEST, il living lab costruito a Zurigo per connettere il mondo della ricerca con quello dell'industria. In cosa consiste la vostra l'innovazione tecnologica?

FLORIO / *L'interesse in quanto gruppo di ricerca era pubblicizzare l'utilizzo di un prodotto che è di nostra invenzione, un nostro brevetto che si chiama SwissInso Kromatix, quindi mostrare l'apparenza estetica e la performance dei pannelli fotovoltaici e termici integrati in facciata con questo rivestimento.*

[...] *A differenza di altri prodotti, la tecnologia Kromatix interviene alla nanoscala per rendere selettivamente trasparente il vetro, quindi fa passare buona parte della radiazione solare tranne la banda che corrisponde allo spettro luminoso del colore che prodotto. Abbiamo preferito avere una gamma di colori e texture minore per arrivare a produrre un po' di più; il prodotto Kromatix dispone infatti di 4-5 colori con un aspetto un po' "glossy", quindi non riesce ad essere proprio satinato, ma se il pannello standard raggiunge un'efficienza del 20% il Kromatix arriva al 18%, ovvero il 95% dell'efficienza del pannello standard.*

_ La piattaforma NEST potrebbe essere intesa come quel campo di prova in cui le nuove tecnologie si avvicinano ad un contesto quasi reale e, di conseguenza, al progetto di architettura nel quale verranno integrate. Che tipo di rapporto si è instaurato con gli architetti dello studio Lutz, il vostro partner di progetto?

FLORIO / *Io ho fatto da architetto-cliente, quindi fissavo i requisiti estetici ed energetici che ci aspettavamo in quanto laboratorio di ricerca che ha commissionato il lavoro insieme al centro Empa, mentre dal lato progettuale c'era lo studio Lutz, che ha sviluppato un concept di facciata per il posizionamento dei pannelli fotovoltaici arrivando alla scala di dettaglio tecnologico. [...] In questo caso la cultura dell'innovazione l'abbiamo portata noi in quanto università e loro hanno portato la natura più materiale, del dettaglio tecnologico. Quindi c'è stata questa sinergia con l'obiettivo di voler "alzare un po' l'asticella" per il fotovoltaico integrato in facciata.*

_ L'evoluzione del BIPV ha condotto a prodotti completamente mimetici che imitano i materiali tradizionali, mentre sono pochi i casi in cui si predilige un'aperta dichiarazione tecnologica. Che riflessioni ha a riguardo?

FLORIO / *Penso ci possano essere entrambe le direzioni, conosco progetti che hanno esaltato la materialità del PV giustapponendola a qualcosa di totalmente diverso ottenendo risultati anche buoni. È chiaro che in un primo momento tenderemo ad imitare i materiali che conosciamo e ai quali siamo più abituati (es. tegole fotovoltaiche che sono poco efficienti e costano molto). Forse un domani saremo più abituati a vedere dei tetti più riflettenti [...] ma al momento in questa fase imitiamo quello che c'è.*

_ La Svizzera è senza dubbio il Paese leader in materia di ricerca e diffusione di sistemi integrati. A cosa è dovuto questo risultato?

_ Il mercato del BIPV ha riscontrato maggiore interesse negli ultimi anni, ma deve ancora superare grossi ostacoli perché diventi una pratica condivisa, specialmente quando l'integrazione avviene in facciata. Che ruolo possono avere gli architetti per agevolare questo trasferimento tecnologico?

FLORIO / *Esiste un soggetto fondamentale per il BIPV che è la proprietà, ovvero il committente inteso sia come proprietario dell'edificio che come installatore dell'impianto fotovoltaico. Tante volte l'impianto non è di chi detiene l'immobile ma viene realizzato da società terze che acquisiscono il diritto all'energia prodotta [...] quindi se c'è un problema contrattuale tra il proprietario dell'impianto ed il proprietario dell'edificio chi ha installato i pannelli può recuperarli, mentre con le soluzioni fotovoltaiche integrate questo è più complesso. [...] Per questo motivo spesso chi installa l'impianto fotovoltaico preferisce il BAPV, ma anche il proprietario dell'edificio lo preferisce perché costa meno. **Quindi l'integrazione riesce solo quando c'è un architetto che si impunta ed è un soggetto così centrale nel progetto a tal punto da convincere sia il committente che l'installatore.***

FLORIO / *In Svizzera il fotovoltaico integrato è più diffuso rispetto ad altri Paesi per diversi motivi, perché intanto c'è maggiore **disponibilità economica** per coprire i costi aggiuntivi del BIPV, poi perché tradizionalmente in Svizzera c'è più **attenzione al paesaggio** rispetto ad altri Paesi, ancora in Svizzera ci sono **programmi energetici** a lungo termine, come per esempio il Pacchetto 202020 o Energia 2030 in Unione Europea, che però valgono solo per la Svizzera.*

In Svizzera questa motivazione a spendere di più arriva dalla forte cultura per il paesaggio che lo svizzero medio ha: buona parte degli svizzeri abita in paesi di montagna (che si sposta per lavoro nelle grandi città durante la settimana) quindi lo svizzero ama molto di più il paesaggio montano. Dalle montagne c'è la vista sulla città, quindi per lui è più una questione di paesaggio che di visione urbana o composizione della facciata. Per questo c'è una forte attenzione all'integrazione sui tetti, per una questione di visibilità lontana di un paesaggio di vallata che può essere perturbato da superfici riflettenti come il PV. Quindi questa attenzione all'integrazione del fotovoltaico rende il mercato più attivo.

3.3 QUESTIONE DI APPROCCI

con **Pierluigi Bonomo**
responsabile del BIPV Advanced Building Skin Team della SUPSI

6.11.2020

Pierluigi Bonomo è membro Task 15 PVPS IEA International Energy Agency e responsabile del BIPV Advanced Building Skin Team della SUPSI, Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, dove svolge l'attività di ricerca presso l'Istituto sostenibilità applicata all'ambiente costruito della SUPSI. Ha conseguito il dottorato di ricerca in Tecnica edilizia e architettura presso l'Università di Pavia.



intervista **Eleonora Merolla**
6.11.2020

In visione dell'European Green Deal e della transizione energetica alla quale l'Unione Europea mira, il lavoro di tesi affronta come tema principale il ruolo che il progetto di architettura ricopre e la sua capacità di saper integrare e trasformare componenti impiantistiche come il PV in nuovi linguaggi formali.

_ L'innovazione tecnologica del *Building Integrated Photovoltaics* risiede in un prodotto innovativo disponibile sul mercato o in un approccio innovativo basato su un modello sinergico tra la ricerca, il sistema impresa, architetti e ingegneri?

BONOMO / *L'aspetto chiave è che **l'innovazione non risiede solo nel prodotto ma anche nell'approccio**. Nel momento in cui mi allontano dall'elemento standard del fotovoltaico concepito solo per la produzione energetica cambio per forza l'approccio.*

_ Questa visione olistica che include ricerca, sistema impresa, architetti e ingegneri potrebbe rappresentare un approccio capace di ridisegnare il ruolo del progetto di architettura? In questo senso, quale ruolo potranno svolgere gli architetti?

BONOMO / *L'architetto è la figura centrale del trasferimento tecnologico in edilizia e l'obiettivo è proprio riuscire a vedere questa tecnologia come un sistema tradizionale. Chiaramente, però, stiamo considerando un sistema attivo e non uno passivo, è un sistema che ha anche delle criticità come il non essere omogeneo, avere delle celle solari che si comportano diversamente a seconda delle posizioni; questo non permette di avere le stesse libertà di un sistema passivo. L'architetto, secondo me, deve essere più **consapevole della tecnologia**. Il livello di approfondimento di questa tecnologia può essere più o meno avanzato, ma generalmente gli architetti devono essere consapevoli. È un sistema che deve essere considerato con molta più naturalezza come avviene con altri sistemi in edilizia.*

_ Gli edifici BIPV realizzati negli ultimi anni adottano soluzioni BIPV su tutto l'involucro e ottengono bilanci energetici positivi. È questa la futura direzione del progetto di architettura in merito all'utilizzo del fotovoltaico integrato?

BONOMO / *Non è possibile prevedere di portare tutte le periferie europee a nZEB, esiste il compromesso tra esigenze energetiche e costi. Magari non serve coprire tutto l'involucro ma bastano delle porzioni per coprire la quota di energia stabilita. Oggi ci troviamo di fronte a dei progetti che sono anche pilota, come quelli presenti sulla piattaforma web Solarchitecture, che magari in Svizzera possono funzionare ma non è detto che sia quello il punto d'arrivo. **Sono progetti che dimostrano cosa è possibile fare, ma non significa che si debba rendere un edificio completamente attivo.***

_ Se il PV integrato sul tetto è di più facile diffusione, quale sarà il futuro per l'integrazione PV in **facciata**? Come si può rispondere alle diverse critiche sollevate in merito al BIPV in facciata, come ad esempio la minore efficienza, l'eventuale presenza di ombre, i costi elevati o l'assenza di normative che impongono una effettiva integrazione in facciata?

BONOMO / Sul piano energetico il concetto degli orientamenti preferenziali (la copertura inclinata di 30° a Sud) era valido durante il periodo dei feed-in-tariff perché si veniva remunerati sulla base dell'energia prodotta, oggi non funziona più così. Dal punto di vista energetico **il vero driver del fotovoltaico integrato è quello di rendere l'edificio il più possibile autosufficiente**, di produrre energia in maniera decentralizzata e di aumentare l'autoconsumo, cosa raggiungibile con esposizioni anche a est ed ovest per distribuire la produzione energetica nella giornata.

I costi relativi al BIPV sono legati al **ritorno dell'investimento**, non si può valutare solo l'investimento al tempo zero. Sono necessarie le analisi costi/benefici per ciascun caso. I costi variano da edificio ad edificio ed anche l'energia che si utilizza varia

BIPVboost è un progetto europeo che sviluppa (come richiesto dalla Commissione Europea) dei prodotti che devono dimostrare una riduzione dei costi del 50% (entro il 2020) e del 75% (entro il 2050), questo vuol dire che si sta lavorando massivamente a livello industriale per abbattere i costi della tecnologia.

Fino a dieci anni fa non era concepibile avere ombra su un pannello fotovoltaico e chiaramente ancora oggi è importante, ma guardando agli ultimi progetti è evidente che **l'ombra è diventata anche parte integrante di queste soluzioni**. Questo non perché è cambiata la tecnologia fotovoltaica, ma perché si è evoluta e si può affidare ad un'elettronica che migliora la produzione nelle zone irraggiate. Si sta arrivando pian piano ad un compromesso tra esigenze di progetto e di tecnologia, come per altre tecnologie.

_ Quanto è conosciuta la tecnologia BIPV nel contesto europeo? La mancanza di informazione sul tema è ancora un **ostacolo** forte alla sua diffusione?

BONOMO / Il problema è che si ha ancora **timore** di questa tecnologia, alcune cose ancora non sono chiare. Nell'ambito normativo per esempio ci sono ancora grosse lacune. È comunque una tecnologia recente e la **normativa** si muove lentamente rispetto all'innovazione industriale. C'è ancora **poca conoscenza** delle potenzialità anche tra i progettisti, altri invece non vogliono accettare la sfida di uscire fuori dalla tradizione. Non c'è ancora molta apertura.

Negli ultimi anni però il mercato è cambiato, è più dinamico e c'è più richiesta, ma i numeri non sono ancora da Green Deal e **crediamo che si debba lavorare specialmente con i progettisti**. Deve diffondersi nella concezione del progetto. Bisogna accettare il compromesso di lavorare con questo sistema.

_ I risultati in termini di diffusione BIPV che sono stati raggiunti finora in **Svizzera** possono essere intesi come il risultato di politiche ed obiettivi che il Paese si è posto nell'ultimo decennio?

BONOMO / **In Svizzera ho imparato che non devono essere le norme ad imporre le cose**. Anche dal basso partono iniziative ed hanno seguito, perché nascono un po' da questa alleanza tra ricerca, industria e progettisti. La settimana scorsa, per esempio, c'era un meeting dell'International Energy Agency sul BIPV dove dalla Svizzera abbiamo partecipato noi come SUPSI insieme allo studio di architettura Karl Viriden e Solaxess come produttore PV. **Le leggi ce le stanno imponendo dall'ondata sostenibile ma adesso ci sono anche tecnologie mature con le quali possiamo raggiungere e soprattutto superare i limiti minimi imposti dalle normative. Deve essere un po' una rivoluzione della progettazione, se ci si crede.**

3.4 TASSELLI MANCANTI PER L'ITALIA

con Alessandro Virtuani
ricercatore senior e responsabile del gruppo Moduli e Affidabilità
presso l'EPFL e co-fondatore della start-up Officina del Sole (O'Sole)

22.03.2021

Alessandro Virtuani è socio fondatore di *Officina del Sole*, start-up di Milano e dal 2016 ricercatore senior e responsabile del gruppo Moduli e Affidabilità presso l'EPFL. Ha ottenuto un dottorato in Scienza dei Materiali presso l'Università di Milano Bicocca, è stato ricercatore presso ESTI (European Solar Test Installation) del Centro Comune di Ricerca di Ispra, è stato poi ricercatore presso lo Swiss PV Module Test Centre della SUPSI



_ Come esperto del settore delle energie rinnovabili e della tecnologia fotovoltaica, crede che il settore edilizio sia al passo per raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione?

VIRTUANI / *Per i target che ci siamo dati al 2030 ed al 2050 con il Green Deal abbiamo assolutamente bisogno di fotovoltaico sugli edifici ed in tutte le infrastrutture. **Serve aumentare l'installato di PV a livelli drammatici, se vogliamo davvero decarbonizzare la nostra economia.** Secondo il PNIEC italiano è necessario aumentare di 3 volte l'installato di PV rispetto al 2018 per raggiungere il target al 2030. Dal mio punto di vista, invece, per raggiungere gli obiettivi fissati al 2050 dovremmo probabilmente aumentare di 20 volte il fotovoltaico che abbiamo installato oggi. Quindi, dove si posiziona tutto questo fotovoltaico senza andare a utilizzare massivamente i terreni agricoli o forestali? **Diventa fondamentale installare più PV possibile negli edifici.** [...] Dal mio punto di vista bisogna quindi rendere prioritaria l'installazione, ma è importante che venga fatta solo sulle superfici dove è disponibile una buona esposizione solare. **Per farlo, però, gli obblighi sui nZEB non bastano e servono più incentivi.***

_ Potrebbe, quindi, essere questo il risultato di un modello collaborativo in cui la ricerca e le imprese lavorano ad obiettivi comuni?

VIRTUANI / *Sia per il fotovoltaico che per altri ambiti c'è veramente **capacità di fare sistema tra la ricerca, la ricerca applicata e l'industria.** Esistono alcuni centri di ricerca che si occupano proprio di fare da anello di congiungimento tra la ricerca universitaria e le realtà industriali, ovvero fanno il cosiddetto **bridging the gap**, il trasferimento tecnologico. **Sia in Svizzera che in Germania queste realtà sono molto diffuse.** Per fare un esempio, a Neuchâtel c'è il centro CSEM che offre servizi di ricerca per l'industria; li hanno portato avanti alcuni progetti tra cui la realizzazione dei moduli fotovoltaici bianchi in collaborazione con l'azienda Solaxess. Con il nostro laboratorio PV-Lab dell'EPFL collaboriamo con il gruppo di ricerca PV del CSEM, per cui è un esempio in cui ricerca, ricerca applicata e partner industriali lavorano insieme.*

_ Nei progetti di R&S ai quali ha partecipato per lo sviluppo e la qualifica di dispositivi fotovoltaici, c'è stata la partecipazione di figure più vicine alla pratica della progettazione architettonica, come gli architetti?

VIRTUANI / *I progetti BIPV sono molto trasversali e per questo anche complessi. Per questi progetti, quindi, **proviamo a coinvolgere e parlare con tutti i portatori di interesse** che possono essere gli architetti, gli ingegneri delle costruzioni, i proprietari di immobili per avere una **panoramica a 360°**, che poi è quella che spesso manca.*

_ Nell'attuale corsa alla transizione energetica, l'Italia in quale posizione si trova? Quali possono essere a suo avviso i tasselli mancanti per un effettivo trasferimento tecnologico nel settore edilizio italiano?

VIRTUANI / **Purtroppo queste realtà improntate a colmare il divario tra la ricerca e l'industria tendono a mancare** in Italia ed è un grosso ritardo per tutto il sistema, ovviamente non solo parlando di fotovoltaico.

_ Sulla base delle attività svolte presso l'Officina del Sole, la start-up di cui è socio, quale tipologia di pubblico appartenente al mercato italiano si rivolge a voi e risulta più attiva e sensibile al tema delle rinnovabili? Il settore delle costruzioni appare in qualche modo attivo?

VIRTUANI / Seppure abbiamo le competenze per lavorare con BIPV, non c'è molta richiesta. Ciò nonostante, da alcuni progetti europei avviati con altre start-up e con il Politecnico di Milano risulta che **negli ultimissimi anni la tematica sta diventando più sentita all'interno del dipartimento di architettura** anche per le nuove direttive europee ed il Green Deal. È una tematica che sta esplodendo.

_ Quando si parla di BIPV si intende un impianto fotovoltaico che diventa esso stesso anche un materiale da costruzione. Quali implicazioni ci sono in termini di affidabilità di questi sistemi?

VIRTUANI / La tematica dell'affidabilità è molto importante per il BIPV perché questi moduli fanno proprio parte della pelle dell'edificio, per cui devono rispettare dei requisiti che altrimenti l'impianto non avrebbe dovuto rispettare come la resistenza al fuoco, l'isolamento termico ed al rumore, l'impermeabilità. [...] Il problema è quindi **garantire la durabilità di un prodotto sugli anni**. Prima si parlava di un tempo di vita di 20-30 anni, ora le aziende parlano di 30-35 anni. Per quando riguarda il BIPV, i fattori che possono ridurre il periodo di vita di un pannello sono l'installazione in contesti non ventilati o con temperature di operazione e la presenza di ombre. Le ombre non abbattano solo la resa energetica di un impianto ma possono anche creare dei danni. Le grosse tematiche della reliability in ambiente PV sono le **ombre** e le più **alte temperature di operazione**.

- 4.1 Geografia del BIPV
- 4.2 Tra forma e per(forma)nce
- 4.3 Strategie di integrazione architettonica
- 4.4 Altre traiettorie di ricerca
- 4.5 Approcci interdisciplinari

4

/ Letture trasversali

I capitoli precedenti hanno fornito una panoramica generale dell'attuale fase di transizione energetica imposta dall'Unione Europea per combattere il cambiamento climatico, sottolineando la necessità di un uso più consolidato di energia rinnovabile soprattutto nell'ambiente costruito. In questo quadro, il sistema BIPV è stato presentato come uno strumento potenzialmente utile ai fini di questa sfida energetica, per la sua stessa natura di componente costruttivo dell'edificio integrato sia a livello funzionale che sotto il profilo formale.

Dato il carattere interdisciplinare di un tema così ampio ed attuale, che necessita di molte altre investigazioni indirizzate verso ambiti differenti, il contributo di Letture Trasversali è il frutto delle tematiche emerse durante l'analisi della letteratura BIPV ed i successivi momenti di confronto organizzati con figure esperte del settore. Vengono in questo modo proposti degli spunti di riflessioni che indagano con traiettorie differenti la relazione tra progetto di architettura e tecnologia BIPV con l'obiettivo di aumentare l'interesse e la conoscenza degli architetti, intesi come figure necessarie per la diffusione del BIPV.

*Il punto di partenza di questo capitolo è la considerazione che il fotovoltaico integrato sia un'innovazione tecnologica che non ha ancora trovato piena comprensione e relativo trasferimento nel mercato delle costruzioni, per cui **il fil rouge della trattazione segue un percorso ordinato che evidenzia i vertici dell'innovazione BIPV, quali più dichiarati, quali più impliciti.** I caratteri di innovazione qui evidenziati sono il frutto di un'analisi critica della letteratura BIPV e vengono talvolta organizzati secondo parallelismi che relazionano casi studio selezionati con una letteratura più trasversale sul tema dell'innovazione tecnologica.*

*Il fine ultimo di questo capitolo, ed in senso lato dell'intero lavoro di tesi, è quello di **dimostrare l'importanza ed il ruolo che il progetto di architettura assume per la diffusione dell'innovazione tecnologica BIPV, sia in termini di valore aggiunto per il progetto, sia per la sfida energetica in atto.***

Sperimentazione tecnologica nel progetto di architettura

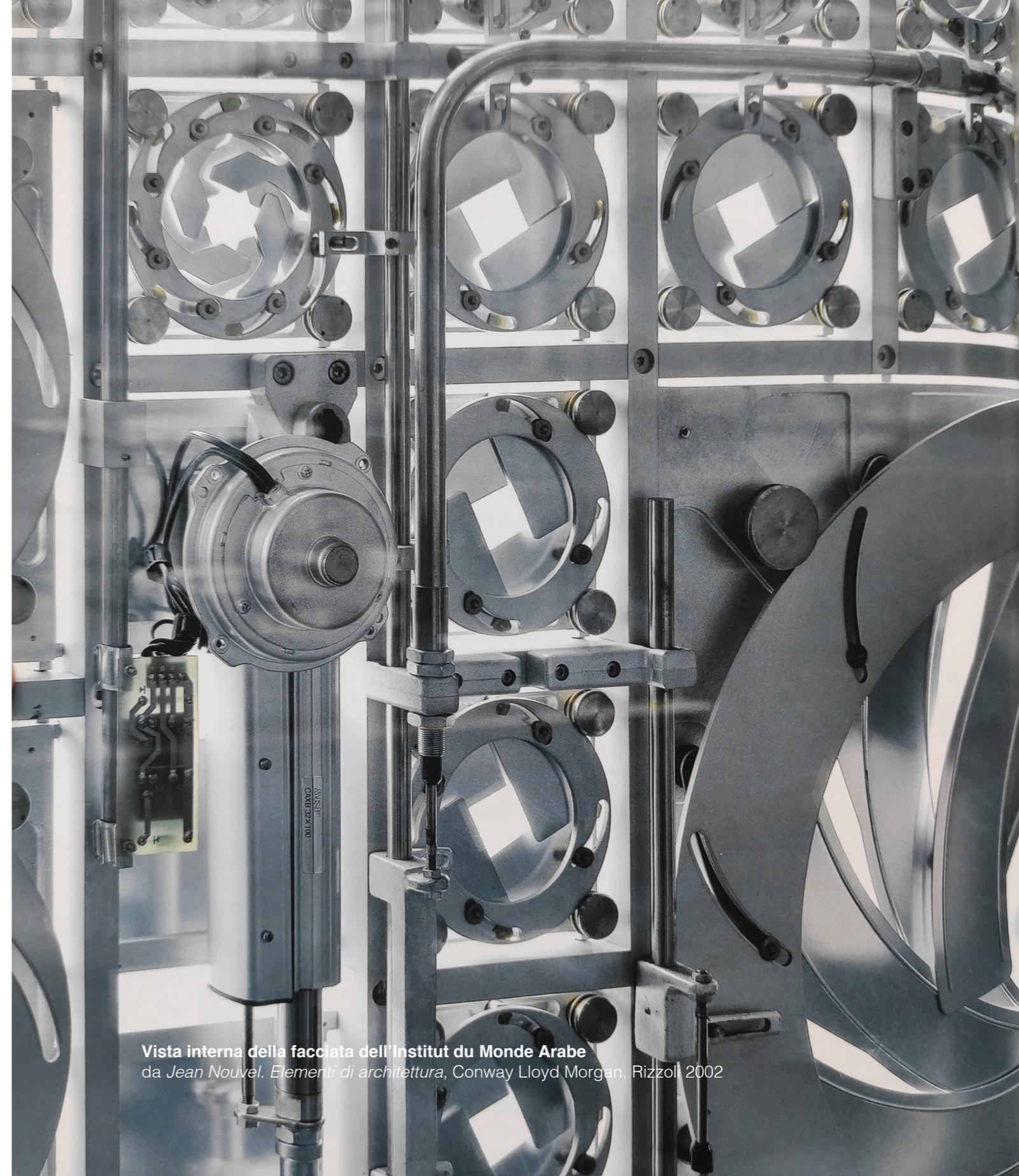
Il progetto di architettura che si sveste della divagazione formale per investigare scenari sconosciuti, fatti di materiali innovativi e nuovi meccanismi e tecnologie da sperimentare è già un nuovo paradigma della contemporaneità; non più uno sguardo al passato nostalgico e pieno di compiacimento, bensì un delicato equilibrio tra il rispetto della tradizione e la spinta dell'innovazione.

La “modernità” raccontata da Jean Nouvel alla Triennale di Milano nel 1996 è proprio “è la migliore utilizzazione della nostra memoria e l'energia più grande, la spinta più forte che si possa ricevere nel senso di un'evoluzione”. (Casamonti 2008)

Con questa tematica si è scelto di accompagnare l'apertura di Letture Trasversali, in una contemporaneità in cui la sperimentazione tecnologica è un ulteriore strumento per la creazione di immagini e sensazioni. Nessuna forma ricorrente, non più uno stile riconoscibile, solo una sensibile e sincera volontà di sperimentazione che accompagna il lavoro di alcune figure internazionali del panorama attuale.

Lo è, ad esempio, il lavoro di Jean Nouvel in cui, riprendendo le parole che Carlo Prati adotta nella monografia dedicata, il processo metodologico di Nouvel consiste nel “*dimenticare l'architettura per riportarla alla dimensione primigenita. Arte tra le arti, non disciplina che deve adottare sistemi creativi mutuati dall'esterno*”. (Prati 2007) Alla deliberata scelta di allontanarsi dalla manipolazione delle forme e dei segni del passato, Nouvel propone una ricerca architettonica mai disgiunta dalla consapevolezza della tecnologia, dalle possibilità e potenzialità che materiali e tecniche innovative possono offrire in una dimensione al tempo stesso funzionale ed espressiva; in un sapiente equilibrio di soluzioni che sanno reinterpretare i contesti tradizionali ma lo fanno con gli strumenti dell'innovazione.

È il caso della facciata dell'Institut du Monde Arabe completato nel 1987 a Parigi, dove il complesso meccanismo d'automazione di diaframmi che regolano l'irraggiamento non vuole rappresentare un'esaltazione tecnologica fine a sé stessa, ma interpreta le geometrie e l'apparato decorativo della cultura araba in una successione ordinata di cerchi e quadrati. Seguendo questa scia ma con un salto temporale di circa trent'anni, il Louvre Abu Dhabi reinterpreta l'immagine tradizionale delle cupole arabe con una soluzione contemporanea in acciaio e alluminio che include gli aspetti legati all'ombreggiamento e al raffrescamento naturale, offrendo alla città un'immagine forte ed evocativa.



Vista interna della facciata dell'Institut du Monde Arabe
da Jean Nouvel. *Elementi di architettura*, Conway Lloyd Morgan, Rizzoli 2002

Seppur per origini e formazione differenti, l'interesse verso la sperimentazione ed il coraggio di affrontare la modernità, intesa non come il Movimento Moderno del primo dopoguerra ma come il periodo storico attuale con le sue incertezze unite a potenziali innovazioni, è costante nel lavoro di Renzo Piano. *“durante i primi sei anni in realtà non ho fatto architettura, nemmeno di carta, intendo dire né progetti disegnati né concorsi. Mi sono invece completamente dedicato alla ricerca nel campo delle strutture e dei nuovi materiali: ho cominciato praticamente alla rovescia, dal cantiere.”* (Piano 1986) Con queste parole Renzo Piano valorizza una “cultura del fare” a lui molto vicina definendosi prima di tutto un “costruttore”, condizione ereditata dall'ambiente familiare in cui è cresciuto ed atteggiamento che lo ha sempre accompagnato nella sua carriera di sperimentatore. Con soluzioni sempre mutevoli e lontane dalle tendenze, la ricerca nel campo dei materiali è stata un'attività in costante dinamismo; le strutture in membrana elastica degli esordi, i sistemi di facciate ventilate in cotto come reinterpretazione dei rivestimenti tradizionali, le ricerche sui sistemi di facciata doppia ventilata.

La lista di architetti che affrontano in maniera poliedrica e al tempo stesso singolare ciascuna architettura potrebbe essere più lunga, ma ciò vanificherebbe lo scopo di questo excursus. Sebbene, infatti, la scelta di accompagnare questo testo alle premesse di *Lecture Trasversali* possa risultare distante dalla tematica BIPV finora trattata, è l'atteggiamento di sincera curiosità e volontà di sperimentare e reinterpretare materiali tradizionali e innovativi che deve rappresentare il modello di pensiero a cui tendere.



Copertura del Louvre Abu Dhabi
fotografia di Sarah Al Agroobi, Architect Ateliers Jean Nouvel

4.1 GEOGRAFIA DEL BIPV

I casi studio presentati in questo capitolo vanno inquadrati come un interessante strumento di lettura per delineare i possibili caratteri di innovazione che regolano il rapporto tra il progetto di architettura e la tecnologia BIPV; in un'ottica più ampia, l'indagine ha evidenziato alcuni meccanismi con cui il progetto di architettura può accettare la sfida energetica in atto, raccontando di nuove strategie progettuali.

Dai capitoli precedenti è emerso come l'Unione Europea si sia schierata in prima linea per affrontare l'emergenza climatica e come gli obiettivi prefissi al 2030 ed al 2050 abbiano forti ricadute sul settore edilizio, all'interno del quale quello residenziale copre il 75% di tutto l'ambiente costruito; inoltre, l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile deve essere vista come una componente più rilevante nel progetto di architettura per poter essere convertita in strategia progettuale, tra cui l'integrazione in facciata appare una valida strada percorribile.

Questa premessa pone le basi per identificare il campo di indagine nel quale si è mossa l'analisi della letteratura BIPV effettuata in questo lavoro di tesi, riducendo il quadro dei casi studio selezionati per *Lecture Trasversali* al contesto residenziale europeo con integrazione BIPV in facciata¹.

Applicando questo filtro di ricerca, la maggioranza dei casi studio indagati e ritenuti appropriati ai fini dell'indagine rientrano nel territorio svizzero, insieme a quello tedesco, austriaco e britannico. Ad oggi la Svizzera rientra senza alcun dubbio tra i Paesi leader per interesse e sperimentazione di fotovoltaico integrato, il cui primato è solo parzialmente dovuto alle politiche energetiche introdotte in anticipo rispetto a quelle dell'UE², ma va ricondotto quasi interamente ad una volontà combinata di fare ricerca sia per ottenere un cambiamento tangibile che per produrre un'architettura che non si pieghi al tecnicismo delle norme.

1. L'analisi dello stato dell'arte del BIPV nel settore residenziale è stata accompagnata dalla valutazione di soluzioni integrate in edifici che, seppur non residenziali, presentassero caratteristiche volumetriche e compositive affini all'oggetto di interesse

2. La Strategia Energetica 2050 è la politica energetica elaborata nel 2011 e trasformata in progetto di legge nel 2013 con l'obiettivo di abbandonare l'uso dell'energia nucleare (in vigore dal 2018)

30

Svizzera

7

Germania

3

Austria

3

Regno Unito

1

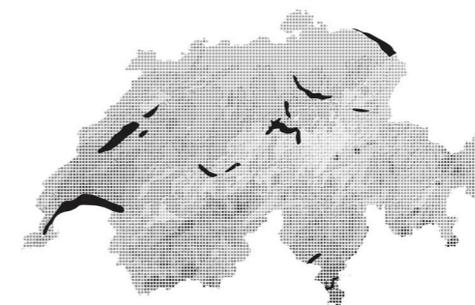
Francia

4

Italia

casi studio identificati

edifici a destinazione
d'uso residenziale
con integrazione
fotovoltaica in facciata
in Europa



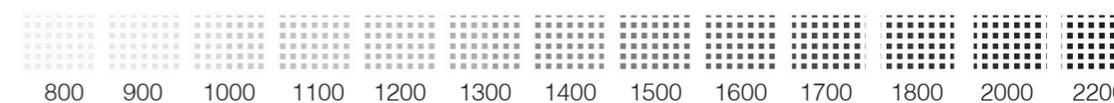
SVIZZERA



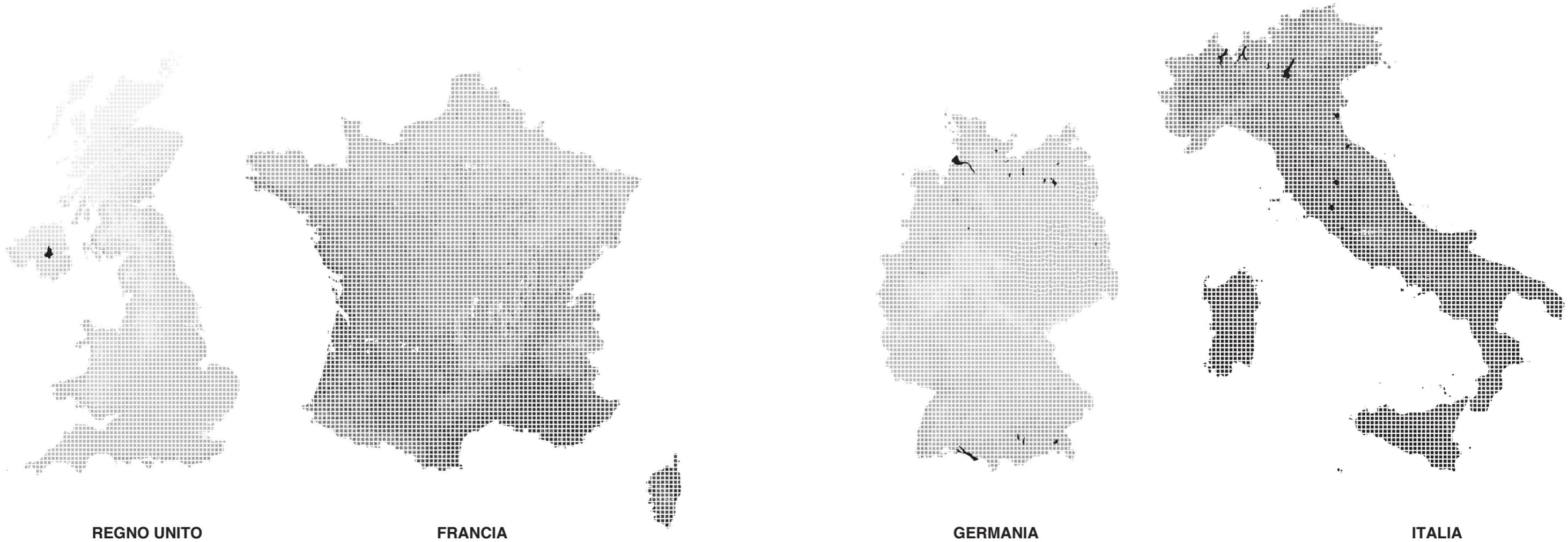
AUSTRIA

0 200 km

irraggiamento annuale [kWh/m²]



(a destra)
Irraggiamento solare annuo
dei Paesi europei selezionati
<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>



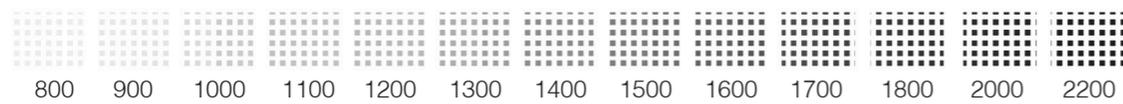
REGNO UNITO

FRANCIA

GERMANIA

ITALIA

irraggiamento annuale [kWh/m²]



0 200 km

Irraggiamento solare annuo dei Paesi europei selezionati

L'Italia è uno dei Paesi europei con il più alto potenziale solare ma il più basso numero di esempi BIPV integrati per edifici residenziali, in particolare in facciata

<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>

Svizzera

30

casi studio identificati

solo esempi di integrazione BIPV in facciata in edifici residenziali

90%

complessi residenziali

case unifamiliari **10%**

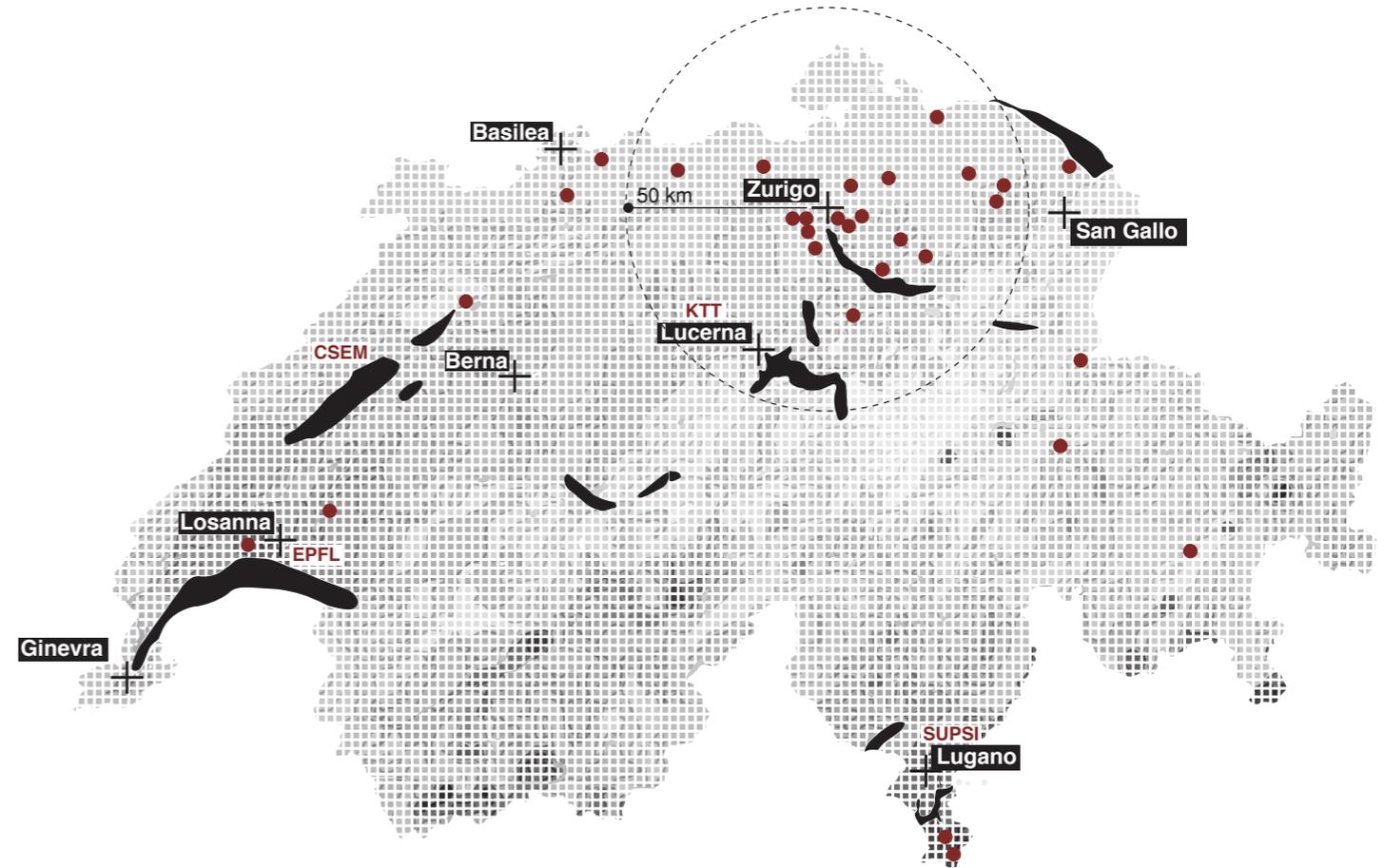
53%

integrazione totale

*la superficie dell'impianto BIPV supera il 50% dell'area della facciata

integrazione puntuale **47%**

*la superficie dell'impianto BIPV non raggiunge il 50% dell'area della facciata



Maggiori centri di ricerca BIPV e di innovazione tecnologica

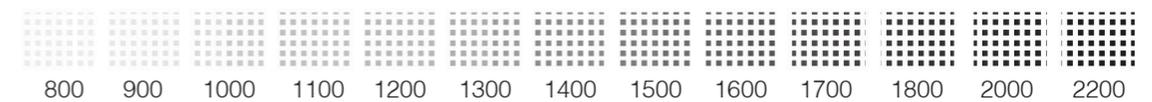
EPFL École polytechnique fédérale de Lausanne

SUPSI Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana
ISAAC Istituto sostenibilità applicata all'ambiente costruito (SUPSI)

CSEM Centre Suisse d' Electronique et de Microtechnique

KTT Center for Knowledge and Technology Transfer
 (Lucerne University of Applied Sciences and Arts)

irraggiamento annuale [kWh/m²]





Rifugio alpino *Kesh Hutte* a Bergün Filisur (CH), 2000



Quartiere *BedZED* a Londra (UK), 2002



14 Unit Housing Development a Ijsselstein, (NL), 2002



Complesso plurifamiliare *Largo Europa Building* a Padova (IT), 2010



Complesso plurifamiliare *Raeber Multifamily House* a Biel (CH), 2010



Complesso plurifamiliare *Casa Solara* a Laax (CH), 2011



Casa unifamiliare a Pratteln, (CH), 2004



Complesso multifunzionale *Blütenburgstrasse* a Monaco di Baviera (DE), 2004



Casa unifamiliare a Lasa (IT), 2007



Complesso plurifamiliare *Hofberg 6/7* a Wil (CH), 2011



Casa unifamiliare *Haus F87* a Stoccarda (DE), 2011



Complesso plurifamiliare a Parigi (FR), 2011



Casa unifamiliare a Gutenberg (DE) 2007



Complesso plurifamiliare *Dawwalder House* a Birmenstorf (CH), 2009



Complesso plurifamiliare *Liebenauer Hauptstrasse* a Graz (AT), 2009



Complesso plurifamiliare *So-larsiedlung Hintere Laugeten* a Einsiedeln (CH), 2012



Complesso plurifamiliare a Romanshorn (CH), 2012



Complesso plurifamiliare *Palazzo Positivo* a Chiasso (CH), 2012



Complesso plurifamiliare *EFH Lech am Arlberg* a Lech (AT), 2013



Complesso plurifamiliare *Licht & Luft* a Tubinga (DE), 2013



Complesso plurifamiliare *Soft House* ad Amburgo (DE), 2013



Complesso plurifamiliare a Gewoba (DE), 2014



Complesso plurifamiliare a Milano (IT), 2014



Complesso plurifamiliare *Aktiv-Stadthaus* a Francoforte (DE), 2015



Complesso plurifamiliare a Ursy (CH), 2013



Complesso plurifamiliare *Kingsgate House* a Londra (UK), 2014



Complesso plurifamiliare a Wald (CH), 2014



Complesso plurifamiliare *Oversea Building* a Chioggia (IT), 2014



Complesso bifamiliare a Wil (CH), 2016



Complesso plurifamiliare a Zurigo (CH), 2016



Complesso plurifamiliare a Eschen (CH), 2014



Complesso plurifamiliare a Triesenberg (CH), 2014



Complesso plurifamiliare a Kapfenberg (AT), 2014



Complesso plurifamiliare *Palazzo Solaris* a Zurigo, 2017



Complesso plurifamiliare *Chrüzmat* a Aesch (CH), 2016



Complesso plurifamiliare a Vacallo (CH), 2016



Complesso plurifamiliare energeticamente autosufficiente a Brütten (CH), 2016



Complesso plurifamiliare *Altstetten* a Zurigo (CH), 2017



Complesso plurifamiliare *Schwamendingen* a Zurigo (CH), 2017



Complesso plurifamiliare a Opfikon (CH), 2019



Complesso plurifamiliare a Zurigo (CH), 2019



Residenza per studenti *Silo Bleu* a Renens (CH), 2019



Quartiere residenziale *Centro Tobel* a Tobel (CH), 2017



Complesso plurifamiliare a Zurigo (CH), 2017



Complesso plurifamiliare a Oeschger (CH), 2018



Complesso plurifamiliare a Männedorf (CH), 2020



Unità abitativa *SolAce* del laboratorio NEST a Zurigo (CH), 2018



Complesso plurifamiliare *740 Fulham Road* a Londra (UK), 2018



Complesso plurifamiliare *Sonnenpark plus* a Wetzikon (CH), 2018

4.2 TRA FORMA E PER(FORMA)NCE

Quando ad oggi si parla di **Building Integrated Photovoltaics** come una potenziale soluzione per il progetto di architettura, il carattere innovativo che di riflesso viene immediatamente identificato è il design esterno del prodotto e sue le caratteristiche formali, tendenza che risponde pienamente all'obiettivo di integrazione formale definita dalle principali linee guida BIPV (integrazione che deve necessariamente accompagnare quella funzionale). (Task 41.A.3/2) (Task 41.A.2)

Il percorso evolutivo del BIPV tracciato al paragrafo 2.4 *Evoluzione del BIPV*, infatti, dimostra come gli sviluppi della componente formale siano oggi il principale interesse per la ricerca, sebbene il carattere multidisciplinare del BIPV possa aprire le porte ad un'indagine più ampia ed includere altri aspetti come il sistema di montaggio o il recupero di energia termica prodotta dall'impianto fotovoltaico. (PVPS T15-07 2019)

Questa propensione della ricerca verso l'aspetto formale del PV è il risultato di quella chiara inversione di tendenza, in precedenza già delineata, che ha segnato il passaggio dal periodo di integrazione di fotovoltaico "standard" a quello di integrazione di fotovoltaico customizzato: in altre parole, il valore del BIPV è ricercato non più nella sua dichiarata evidenza, ma nella volontà di celarne la tecnologia; (SUPSI 2017) è stato questo il cambio di paradigma che ha dato avvio a programmi di ricerca focalizzati sulla produzione di una gamma più ampia di prodotti fotovoltaici, customizzati in colori e forme diverse.

Sebbene l'adozione di soluzioni fotovoltaiche dalle elevate prestazioni formali sia una pratica recente e relativa solo all'ultima, ed attuale, fase dell'evoluzione del BIPV, l'interesse verso una maggiore sensibilità sull'integrazione del fotovoltaico ed il suo aspetto era già presente in precedenza, come nel progetto europeo *PV ACCEPT* avviato nel 2001 e terminato nel 2004. (PVACCEPT 2005)

Il progetto voleva sottolineare l'importanza di innovare l'aspetto formale dei moduli fotovoltaici, fino a quel momento sottovalutato, per aumentarne il grado di accettazione e "sbloccare" nuove possibilità di integrazione anche in quei contesti che richiedono una maggiore sensibilità come i siti storici. A tale scopo erano state selezionate aree di ricerca di particolare valore culturale e paesaggistico per testare nuove soluzioni BIPV integrate come dimostratori temporanei sugli edifici storici e nei siti di interesse ed erano stati registrati i *feedback* della popolazione, con esiti positivi; i quattro luoghi selezionati erano il Castello Doria di Porto Venere, il Castello di San Giorgio di La Spezia, Bocca di Magra nel comune di Ameglia (SP) in Italia e la città di Marbach sul Neckar, nei pressi di Stoccarda in Germania.

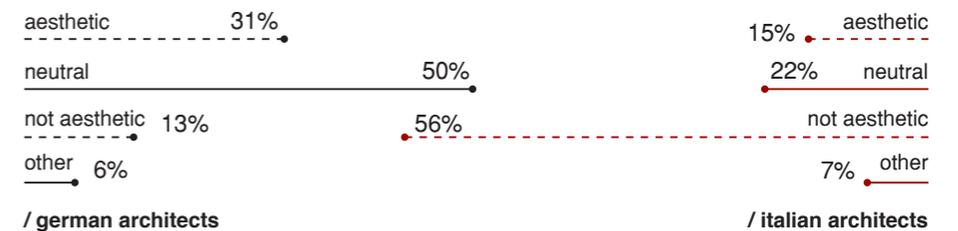
Ai fini di questo lavoro di tesi, l'aspetto di interesse verso il progetto *PV ACCEPT* risiede nel risultato di alcuni sondaggi effettuati tra popolazione ed i professionisti per misurare il grado di accettazione e conoscenza del fotovoltaico. Un primo sondaggio effettuato nel 2001 tra i residenti delle aree selezionate aveva fornito una panoramica generale della percezione della popolazione in merito a moduli fotovoltaici standard, ritenuti principalmente sgradevoli alla vista o neutrali: nello specifico, il 62% delle risposte ottenute dall'Italia considerava i moduli fotovoltaici "antiestetici", mentre il 72% di quelle ottenute dalla Germania li riteneva neutrali. Al di là di evidenti differenze sul grado di accettazione estetica di ciascun Paese, entrambe le popolazioni avevano espresso pareri fortemente concordi sulla necessità di implementare le caratteristiche formali dei moduli PV per facilitarne la diffusione ed avevano espresso per circa il 50% delle risposte in entrambi i Paesi il consenso di installazione di impianti fotovoltaici sui monumenti storici, quando rispettosi del contesto. A seguito di questo sondaggio preliminare ne era stato condotto un secondo più specifico, al quale erano stati invitati a partecipare architetti tedeschi ed italiani per "misurare" il grado di accettazione tra le figure che rappresentavano, come ancora oggi avviene, figure essenziali per la diffusione del PV nel settore edilizio **figura 1**. Coerentemente con i risultati del primo sondaggio, gli architetti italiani

consideravano i pannelli fotovoltaici standard molto più sgradevoli di quanto facessero gli architetti tedeschi, in particolar modo quando integrati in facciata ed il 70% delle risposte ricevute dall'Italia dichiarava come la chiave principale per i futuri sviluppi fosse proprio la componente formale; circa la stessa percentuale ricevuta dalla Germania, invece, considerava il miglioramento dell'efficienza l'aspetto principale sul quale focalizzarsi.

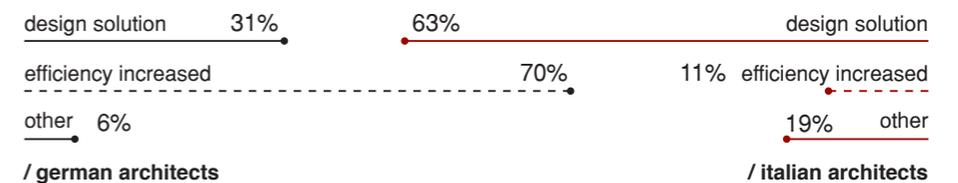
Tra le considerazioni finali del progetto, inclusa anche la fase dimostrativa delle installazioni, emergeva ancora una volta l'opinione condivisa di come il design dei moduli fosse un fattore di accettazione più importante di quanto in quegli anni venisse tenuto in considerazione. (Hirschl 2005)

figura 1
Dati del progetto
PV ACCEPT
(2001-2005)
(fonte: PVACCEPT 2005)

Standard solar modules on the facades



Central aspects for the development of innovative PV modules



Si intuisce, quindi, come questo binomio estetica / efficienza abbia radici più lontane¹ e che negli anni abbia registrato sempre maggiore interesse diventando ad oggi il principale carattere di innovazione del fotovoltaico integrato. A questo proposito è possibile citare le attività di ricerca condotte all'EPFL nel Laboratorio di Architettura e Tecnologie Sostenibili (LAST) e nel Laboratorio di Energia solare e fisica degli edifici (LESO-PB), i cui progetti di ricerca sono riconosciuti a livello internazionale nel panorama BIPV.

Come introdotto in precedenza, quindi, la componente estetica rappresenta oggi il principale driver di innovazione tecnologica per fornire maggiori possibilità di integrazione del PV nel progetto di architettura; questo percorso, però, verte verso una generale tendenza a mimetizzare la tecnologia fotovoltaica che comporta di conseguenza una ricaduta di efficienza elettrica; è proprio questo *balance* tra la personalizzazione dei moduli BIPV e la loro affidabilità in termini prestazionali che rappresenta la sfida attuale. L'approfondimento al paragrafo 2.6.3 *Approfondimento. Caratteristiche formali* ha fornito una panoramica generale delle attuali procedure di colorazione e trasparenza offerte dal mercato BIPV, il risultato di una graduale introduzione dell'industria del vetro in quella del fotovoltaico.

È in questi termini che deve essere intesa una delle radicali differenze tra le soluzioni BAPV e BIPV: se gli impianti fotovoltaici installati sulle coperture, quelli che nell'immaginario comune si presentano come i classici pannelli blu / neri, hanno come unico fine la produzione di energia elettrica da garantire con le migliori esposizioni e l'assenza di ombre, i sistemi BIPV sono parti costrittive dell'edificio, per cui i moduli integrati nell'involucro come rivestimenti esterni, schermature solari, vetrate, devono necessariamente dialogare con il progetto e mettere in conto eventuali ricadute prestazionali a favore di una maggiore accettazione ed integrazione.

È quello che succede per il **Wohnhaus Solaris (Palazzo Solaris)**, un edificio residenziale di nuova costruzione progettato nel 2017 a Zurigo da Huggenbergerfries Architekten.

1. Per “radici lontane” si tenga sempre presente che l'integrazione del fotovoltaico sugli edifici è una pratica relativamente recente in cui i primi casi di sperimentazione si registrano solo negli anni Settanta.

PALAZZO SOLARIS

“Ci siamo resi conto che il vantaggio in termini architettonici è superiore alla perdita di efficienza. [...] Togliamo il 20% di efficienza energetica e aggiungiamo un costo del 20%. [...] Da un punto di vista fisico ed economico, si tratta di un'assurdità. [...] Tuttavia, per favorire l'accettazione e la diffusione della tecnologia solare, c'è proprio bisogno di progetti come questo. [...] Si tratta di un compromesso tra estetica ed efficienza e noi siamo in grado di controllarlo in modo mirato.”

Sono queste le parole di Stephen Wittkopf, architetto e professore presso l'Università di scienze applicate e arti di Lucerna in Svizzera (HSLU) che ha collaborato come ricercatore al fianco dell'azienda Ertex Solar per lo sviluppo e la produzione *ad hoc* dei moduli BIPV adottati nell'edificio Solaris. (Solaris#01)

L'obiettivo iniziale era quello di realizzare un edificio in vetro che potesse in qualche modo ricordare il riflesso ed i giochi di luce creati dall'incresparsi delle acque del vicino Lago di Zurigo ma, a seguito di una fase di sperimentazione preliminare con differenti vetri pressofusi, gli architetti hanno vagliato l'ipotesi di sfruttare la luce anche per la produzione energetica. È da qui che nasce il concept di Solaris, un edificio che generasse energia elettrica senza che questa venisse apertamente dichiarata. “*Negli edifici a me conosciuti, il modulo fotovoltaico con gli angoli smussati è troppo dominante. Si nota solo la tecnologia e non l'edificio*” dichiara l'architetto Lukas Huggenberger (Solaris#01)

L'edificio si trova in prossimità del lago di Zurigo tra la strada trafficata di Seestrasse da un lato e la linea ferroviaria dall'altro, per cui il progetto doveva coniugare diverse esigenze: ogni appartamento doveva poter godere quanto possibile della vista sul lago, doveva

rispettare l'Ordinanza contro l'inquinamento fonico e doveva garantire il miglior soleggiamento possibile. Ne è risultato un edificio da una planimetria inusuale che ricorda la forma di una clessidra, più stretta sul lato strada rispetto al fronte posteriore adiacente ai binari e che nella parte centrale si restringe ancora di più; questo restringimento centrale offre anche agli appartamenti posteriori la vista sul lago, nonché crea le condizioni per avere aperture discoste dalle fonti di rumore. Il dislivello del terreno è un ulteriore fattore di complessità che viene gestito con uno sfalsamento delle due metà dell'edificio e determina uno sviluppo della copertura dalla configurazione sfaccettata. Al di là dei vantaggi in termini di qualità abitativa, la particolare volumetria del progetto garantisce una superficie più ampia e variegata, vantaggiosa per consentire una produzione energetica distribuita in modo più uniforme nell'arco della giornata²; l'intero edificio è infatti completamente rivestito di moduli fotovoltaici mimetici senza telaio, integrati sia in facciata che in copertura con sistemi di ancoraggio nascosti.

Huggenbergerfries Architekten

Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2017
Zurigo, CH

Schweizer Solarpreis 2018
Innovation Award for Building-Integrated Photovoltaics

PV monocristallino mimetico / facciata ventilata
PV monocristallino mimetico / copertura

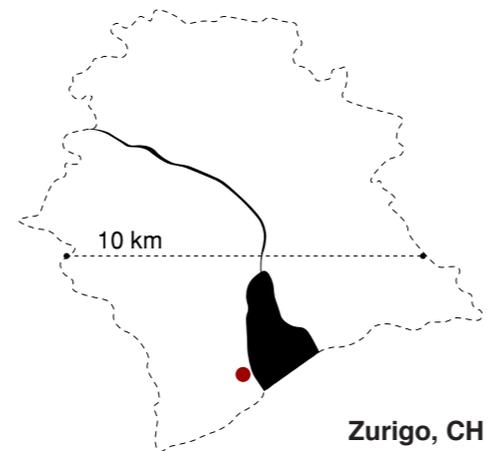
400 m² di superficie attiva / facciata ventilata
200 m² di superficie attiva / copertura

Sud / Est / Ovest / Nord

plus

_ sistema di stoccaggio a breve termine / batteria di accumulo

47% autoconsumo



2. Per approfondire i vantaggi degli orientamenti "non preferenziali" si guardi il paragrafo 2.3 *Cosa hanno da offrire le facciate*



Colore e forma

L'analisi della letteratura BIPV inquadra quelle architetture che in modo più maturo sono in grado di sfruttare le fonti di energia rinnovabile per trasformare la tecnologia più evoluta e la relativa impiantistica in condizione di progetto, una visione complessiva in cui gli imperativi tecnologici incontrano la coerenza compositiva e la sensibilità paesaggistica.

In questo caso, il tema dell'accettazione del fotovoltaico con cui si è aperto il paragrafo è stato l'oggetto principale della lunga attività di ricerca condotta dall'Università di Scienze Applicate di Lucerna per la realizzazione di questi moduli fotovoltaici. (nfp-energie-1001)

L'obiettivo, infatti, era quello di rendere invisibile la tecnologia fotovoltaica, una procedura che tendenzialmente implica un calo di efficienza energetica e che ha rappresentato uno dei principali ostacoli del progetto. Nel 2017, anno di conclusione della costruzione, il processo di colorazione del fotovoltaico era una procedura già accolta dalle imprese di produzione di PV, ma erano pochi gli edifici realizzati che la adottavano; per tale motivo, l'assenza di un *know-how* solido ha reso il progetto Solaris un'effettiva sperimentazione che da un lato è stata resa possibile dal lavoro del team di ricerca di Lucerna con il professor Stephen Wittkopf ed il ricercatore Christian Roeske in collaborazione con Ertex Solar, dall'altro dagli architetti che, in veste anche di clienti ed investitori del progetto, hanno rappresentato i principali promotori di una soluzione che dai primi test effettuati in laboratorio poteva apparire un controsenso.

I moduli fotovoltaici di Palazzo Solaris sono stati realizzati con stampa digitale su vetro-ceramica, un procedimento di colorazione che interessa il vetro portante anteriore del modulo: in altre parole, una pasta ceramica viene applicata sul retro del vetro anteriore, ovvero quello posto davanti alle celle fotovoltaiche, con una disposizione tale da celare la tecnologia e permettere al tempo stesso il passaggio

/ esploso prospettico

modulo fotovoltaico VSG DesignPV

ERTEX SOLARTECHNIK GMBH

modulo in vetro stratificato di sicurezza VSG

(Elaborazione propria)

1 / vetro customizzato _ stampa digitale con vernice ceramica su vetro scanalato

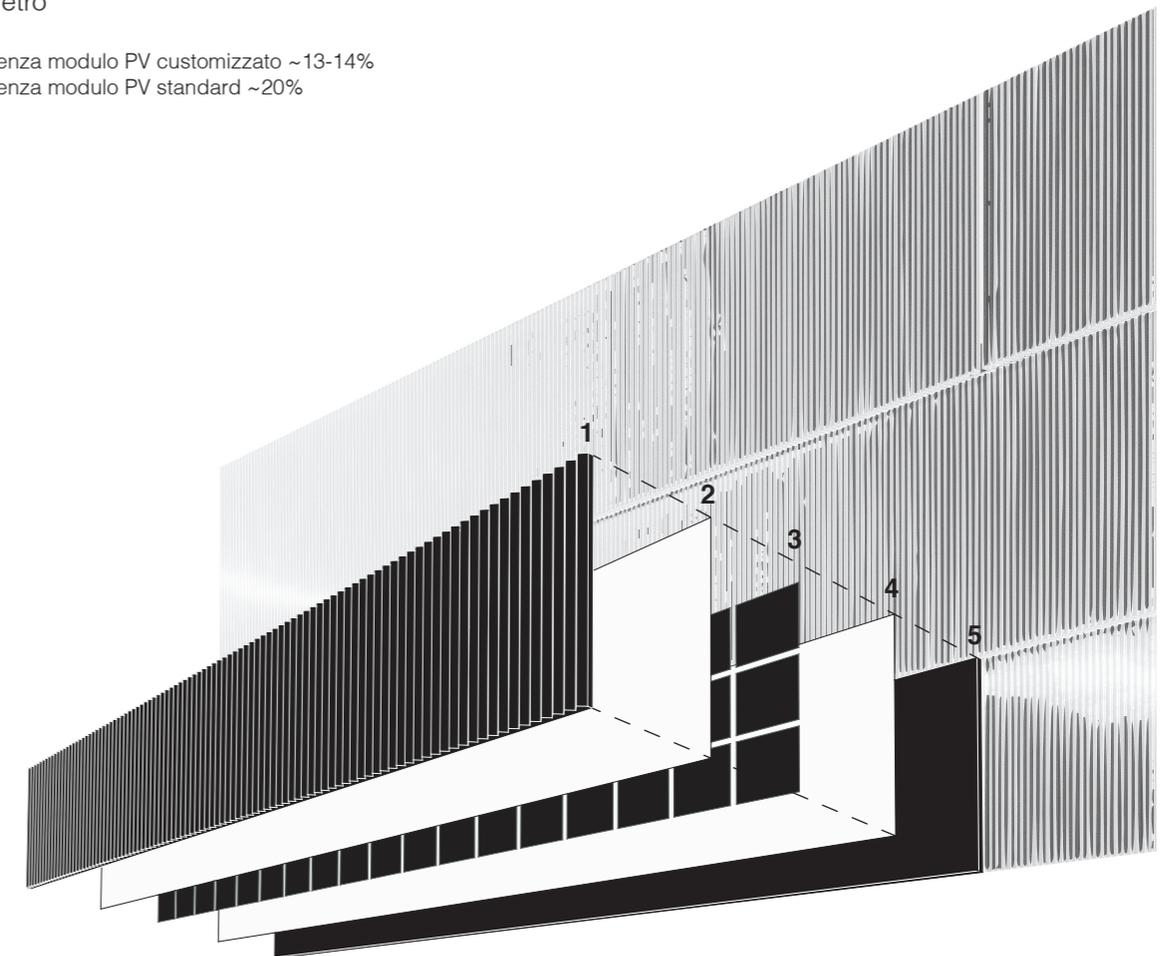
2 / film di PVB

3 / celle PV monocristalline

4 / film di PVB

5 / vetro

* efficienza modulo PV customizzato ~13-14%
efficienza modulo PV standard ~20%



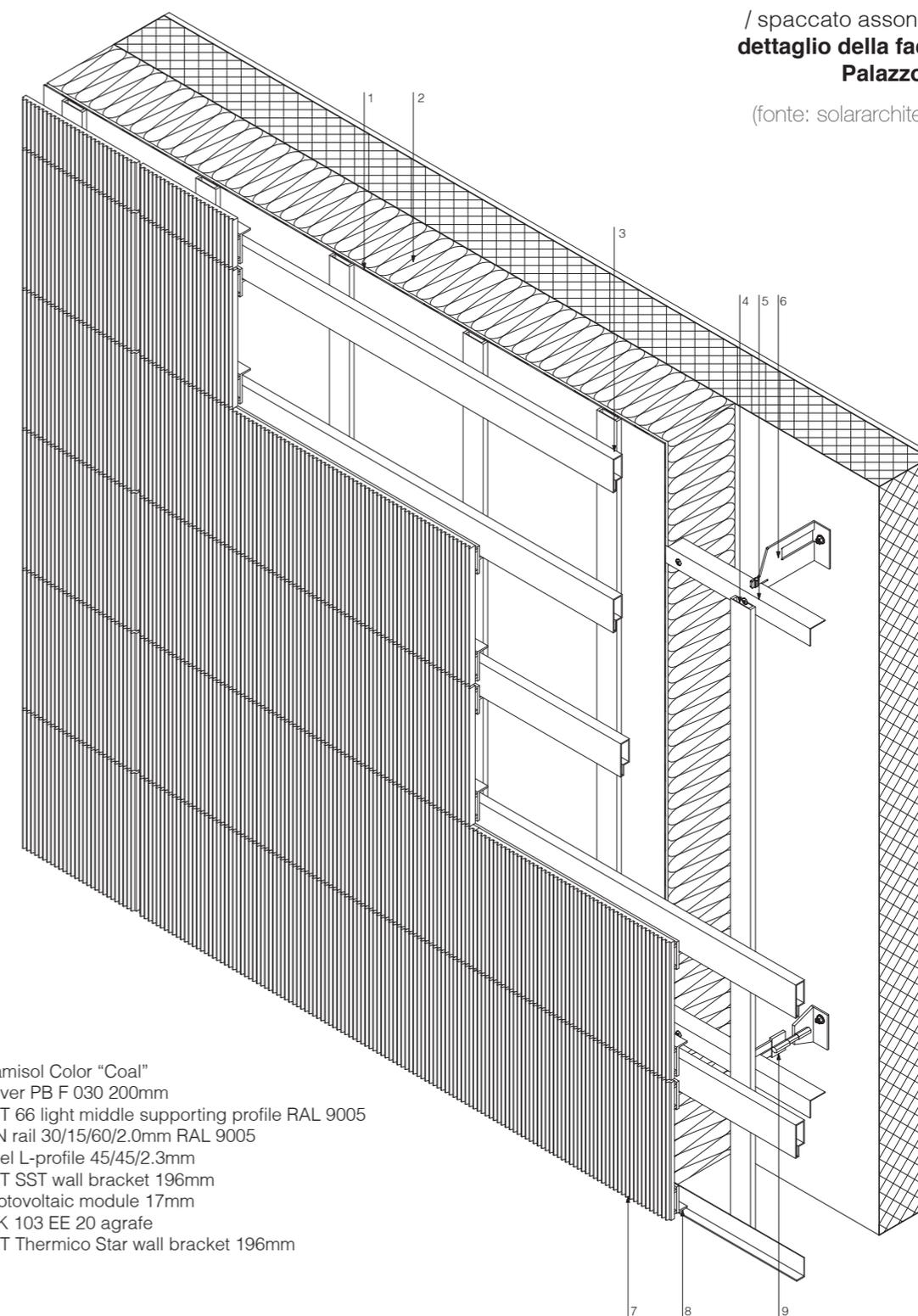
della luce. (PVPS T15-07 2019) In questo caso specifico, la volontà degli architetti di simulare l'increspatura dell'acqua colpita dalla luce ha trovato risposta in un processo di lavorazione del vetro più complesso che ha permesso di ottenere le scanalature desiderate; questa scelta, inoltre, ha guidato alla produzione di un vetro profilato capace di dirigere sulle celle fotovoltaiche anche la luce diffusa, in modo da ridurre la trasmissione della radiazione solare solo del 1,5% rispetto ad un vetro solare visibile. Il risultato di questo lavoro è un prodotto che raggiunge un'efficienza energetica compresa tra il 13% ed il 14%, paragonata a quella di un modulo fotovoltaico standard la cui efficienza si aggira attorno al 20%. Rispetto a soluzioni standard, quindi, l'occultamento delle celle fotovoltaiche ha ridotto la produzione di energia elettrica di circa il 35%, ma al tempo stesso ne ha permesso l'accettazione e l'utilizzo. (Solt 2017)

Oltre i processi di colorazione, la stessa disposizione e composizione dei moduli fotovoltaici nel progetto di architettura fa parte di quel compromesso necessario tra forma ed efficienza implicito del BIPV.

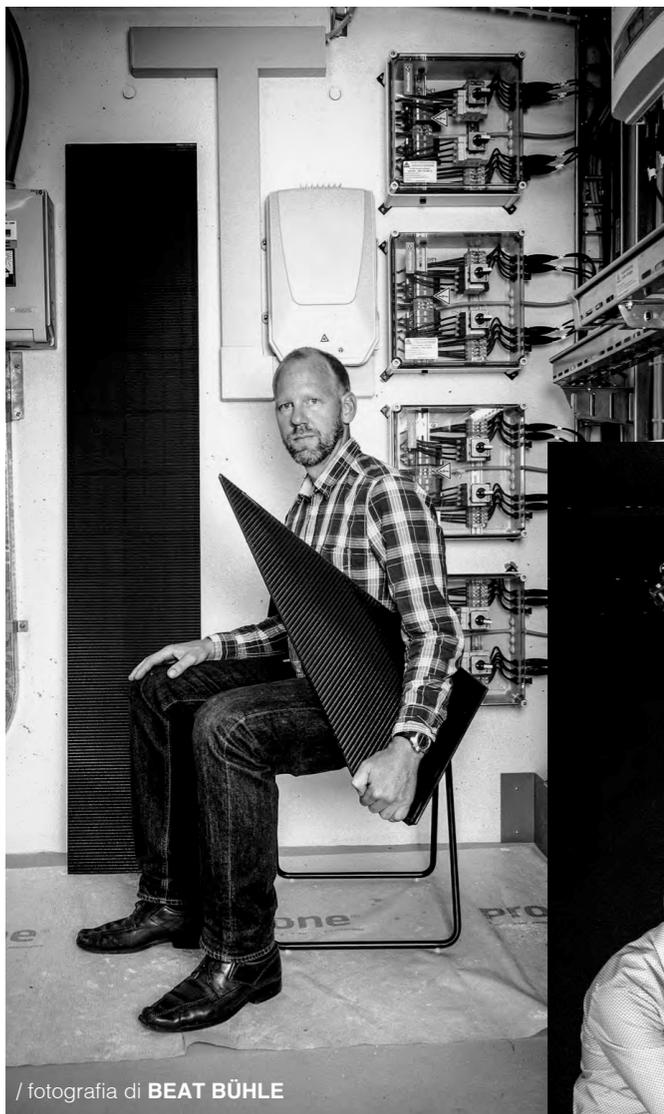
Nel progetto Solaris, infatti, il fotovoltaico è integrato come rivestimento esterno su tutto l'edificio al fine di ottenere un'immagine omogenea e monolitica, integrata nel contesto. A tale scopo, i moduli vetrati senza telaio hanno una distanza di appena 4 millimetri e sono stati prodotti sia in formato standard, 196 x 35 cm, che come formati speciali, con sagome tagliate direttamente in cantiere e successivamente inviate allo stabilimento per la produzione. (Solaris#01) L'integrazione dei moduli come rivestimento dell'edificio implica, però, anche l'esposizione ad orientamenti meno favorevoli e la presenza di ombre, un aspetto che deve essere preso in considerazione dalle prime fasi progettuali.

/ spaccato assonometrico
**dettaglio della facciata di
 Palazzo Solaris**

(fonte: solararchitecture.ch)



- 1 / Stamisol Color "Coal"
- 2 / Isover PB F 030 200mm
- 3 / GFT 66 light middle supporting profile RAL 9005
- 4 / DIN rail 30/15/60/2.0mm RAL 9005
- 5 / steel L-profile 45/45/2.3mm
- 6 / GFT SST wall bracket 196mm
- 7 / photovoltaic module 17mm
- 8 / ATK 103 EE 20 agrafe
- 9 / GFT Thermico Star wall bracket 196mm



/ fotografia di BEAT BÜHLE

Christian Roeske nel locale tecnico di Palazzo Solaris con un modulo fotovoltaico uguale a quello usato per il progetto



/ fotografia di BEAT BÜHLE

Il Professor Stephen Wittkopf di Lucerna si occupa di aumentare l'efficienza energetica dei prodotti in vetro stampato

Ombreggiamento

La complessità dell'ambiente costruito non garantisce sempre gli scenari più favorevoli per la massima produzione energetica, che può ridursi a causa di vincoli urbani ed edilizi che generano ombreggiamento: una elevata densità urbana nelle aree densamente edificate, oggetti urbani come la vegetazione o le infrastrutture stradali, la densificazione urbana, ovvero la possibilità di un futuro sviluppo urbano sono quei vincoli urbani che possono generare ombra ed influire sul potenziale di energia solare. A questi vanno sommati i fattori costruttivi che dipendono dal progetto architettonico: le dimensioni e l'orientamento, che stabiliscono le superfici destinate all'integrazione del PV e definiscono un profilo giornaliero della produzione energetica e la composizione dell'edificio, che può presentare elementi aggettanti causa di ombreggiamento. (solararchitecture.ombreggiamento)

L'ombreggiamento dell'impianto fotovoltaico riduce notevolmente la sua efficacia perché le celle fotovoltaiche non vengono investite dalla luce diretta, ma sono gli ombreggiamenti vicini, quelli che investono solo parzialmente un modulo fotovoltaico, che potrebbero causarne anche dei danneggiamenti; questo accade perché quelle celle fotovoltaiche in ombra, all'interno di un modulo investito dai raggi solari, fungono da dissipatori di calore e provocano un aumento di temperatura del modulo che può raggiungere valori intorno a 100°C. Nei casi peggiori, il surriscaldamento della cella può produrre il fenomeno di *hot-spot* che può provocare danneggiamenti irreversibili all'impianto. Per evitare questo fenomeno, l'impianto è dotato di diodi *by-pass* che impediscono il passaggio del flusso di corrente attraverso la cella oscurata. (bipv.ch)

I disturbi causati da eventuali ombreggiamenti parziali del fotovoltaico possono essere ridotti quando la progettazione architettonica include il sistema BIPV fin dal concept iniziale ed è proprio quello che avviene nel progetto Solaris. L'edificio si presenta come un cor-

po sdoppiato ma unito nella parte centrale, in cui la configurazione sfaccettata dell'involucro è bilanciata da un ininterrotto rivestimento di moduli fotovoltaici che quasi mai si trovano in ombra, risultato della scelta progettuale di preferire, ad esempio, le logge ai balconi; inoltre, la sua collocazione rispetto all'ambiente costruito è tale da non provocare l'ombreggiamento da altri vincoli urbani.

Orientamento

Anche l'orientamento dell'edificio e l'esposizione delle superfici fotovoltaiche sono fattori che concorrono al tema del compromesso dato che la prassi comune per ottenere una massima produzione è quella di orientare l'impianto fotovoltaico a Sud con inclinazione (angolo di tilt) dai 30° ai 35° (condizione valida nell'emisfero boreale, alle latitudini del Centro Europa). A questo proposito, però, va ricordata la discussione proposta al paragrafo 2.3 *Cosa hanno da offrire le facciate* che ha già dimostrato i vantaggi degli orientamenti diversi da quello Sud per ottimizzare il profilo giornaliero della produzione energetica ed aumentare in questo modo l'autoconsumo dell'edificio.

In Solaris questo viene raggiunto non solo per l'integrazione del fotovoltaico su tutti i fronti, ma anche per merito della composizione dell'edificio, che con il restringimento centrale ed il dislivello del terreno, dispone di un involucro da molteplici orientamenti. Quando Christian Roeske ha lavorato ai calcoli energetici, è emerso che alcuni fronti non producevano molta energia, come poteva essere prevedibile per le esposizioni a Nord, ma che la produzione di energia era più distribuita nell'arco della giornata determinando un bilancio energetico complessivo positivo. (Solaris#01)

La lunga ricerca dell'equilibrio tra estetica ed efficienza per una soluzione fotovoltaica integrata, unita al carattere sperimentale di un progetto portato a termine per la determinazione di Huggenberger-fries Architekten, lo rende un edificio chiave per inquadrare l'attuale aspetto di innovazione del BIPV, aspetto che nel 2018 gli ha conferito sia il premio *Swiss Solar Prize* che *l'Innovation Award for Building Integrated Photovoltaics* dalla Austrian Technology Platform Photovoltaics (TPPV).

4.3 STRATEGIE DI INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA

Quando si afferma che il fotovoltaico integrato rappresenta una nuova soluzione costruttiva alla quale oggi il progetto di architettura può fare affidamento e lo si eleva alla pari di un altro materiale da costruzione, è importante fermarsi a riflettere sulle libertà e, di conseguenza, sulle opportunità che le singole scelte progettuali possono cogliere per rispondere ad esigenze differenti.

È in questo passaggio che va evidenziata una chiave di lettura importante.

Quando si affronta l'argomento BIPV solo in termini di nuovo *prodotto* da costruzione, con le sue elevate caratteristiche formali e funzionali, si potrebbe correre il rischio di dilungarsi in descrizioni complessive di cosa sia *Building Integrated Photovoltaics* che, pur capaci di fornire una panoramica globale, rischiano di omettere invece un aspetto chiave: **è la capacità del progettista di intravedere nei requisiti energetici delle nuove opportunità che permette di concretizzare quell'evoluzione da componente solare ad espressione di un linguaggio architettonico fortemente ambita dai difensori del fotovoltaico integrato.**

Quando durante una delle interviste organizzate ai fini della ricerca Pierluigi Bonomo afferma che *"deve esserci una rivoluzione della progettazione, se ci si crede"*¹ (Bonomo, 2020) quello che vuole sostenere non è ripensare necessariamente l'architettura, ma, contrariamente, riconoscere nel BIPV un sistema (o un componente) che alla pari di quelli tradizionali permetta di continuare a *produrre* architettura.

Questa premessa risulta necessaria per comprendere in modo critico le strategie che di volta in volta vengono adottate e per riconoscere il significato che alcune architetture BIPV acquistano quando vengono riconosciute come tentativi sperimentali per fronteggiare le

1. Pierluigi Bonomo è un ricercatore italiano attualmente attivo presso il centro di ricerca svizzero ISAAC della SUPSI. Per approfondire si veda la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

esigenze relative all'efficienza del patrimonio edilizio.

Considerati gli eccessivi consumi energetici che hanno reso gli edifici i principali target su cui intervenire, da circa un decennio le normative impongono valori minimi di consumo energetico ed implicano una parte di energia da produrre in loco con fonti rinnovabili. (2010/31/UE) (2012/27/UE) (2018/844/UE)

I rinomati nZEB, gli edifici ad energia "quasi" zero imposti dalla direttiva 2010/31/UE a partire dal 2020 (2010/31/UE)², avviano quel processo che vede il principale driver del fotovoltaico allontanarsi dalla *massima efficienza dell'impianto* dettata dal *feed-in-tariff* per raggiungere *l'autoconsumo dell'edificio*. Oltre una maggiore quota di energia rinnovabile da produrre autonomamente, questo passaggio implica anche un utilizzo più ragionato del fotovoltaico, che esce dagli scenari incontestabili degli orientamenti preferenziali (esposizione a Sud nell'emisfero boreale, inclinazione dai 30° ai 35°) per integrarsi in nuove forme³.

Il paragrafo sarà quindi strutturato con l'analisi critica di alcune architetture BIPV e le rispettive strategie di integrazione, ma per maggiore chiarezza è possibile fare riferimento a due distinte modalità di approccio BIPV⁴: un approccio conservativo ed un approccio innovativo. (Clua Longas 2019)

Secondo il primo approccio, quello più comune, l'edificio consuma l'energia generata in situ dal proprio sistema BIPV quando la necessità, ovvero nei momenti della giornata in cui la curva della domanda energetica dell'edificio combacia con quella della produzione energetica BIPV, mentre la restante quota di energia non consumata viene inviata alla rete elettrica. Questa condizione è dovuta al fatto che l'impianto fotovoltaico converte direttamente la radiazione solare in energia elettrica, ma tra il picco di domanda energetica di un edificio residenziale ed il picco di produzione elettrica dell'impianto c'è uno sfasamento temporale, con valori massimi rispettivamente durante la sera e durante le ore centrali della giornata. **figura 1** A causa di questo sfasamento, l'approccio conservativo generalmente limita la quantità di superficie attiva per evitare la sovrapproduzione energetica⁵ (Aguacil Moreno 2019).

Perché invece gli edifici possano conservare l'energia generata dal proprio sistema BIPV ed essere completamente autosufficienti, l'approccio innovativo implica l'utilizzo di sistemi di gestione dell'e-

2. Entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere *nearly energy zero buildings*, con una ridotta domanda energetica da coprire in misura significativa con risorse rinnovabili, comprese quelle da produrre in loco

3. A differenza dei *feed-in-tariff*, i meccanismi di incentivazione che premiavano l'energia prodotta ed immessa in rete e che quindi tendevano alla massima produzione energetica con installazioni orientate sempre a Sud ed inclinate di 30°-35°, l'energia prodotta dagli edifici nZEB deve cercare di ridurre quanto più il divario tra fabbisogno energetico dell'edificio e produzione energetica, puntando ad una produzione energetica giornaliera più uniforme nel corso della giornata. A tale scopo, il paragrafo 2.3 *Cosa hanno da offrire le facciate* dimostra come orientamenti diversi da quello Sud, come Est ed Ovest possono contribuire a questo risultato.

4. Le modalità di approccio BIPV sono state presentate nel lavoro di dottorato di Angela Clua Longas presso l'EPFL nel novembre 2019

5. Questo approccio è stato largamente discusso nel lavoro di Sergi Aguacil Moreno presso l'EPFL nel maggio 2019

6. Per approfondire il concetto di Smart Grid si veda il paragrafo 1.5 *Il futuro delle energie rinnovabili*

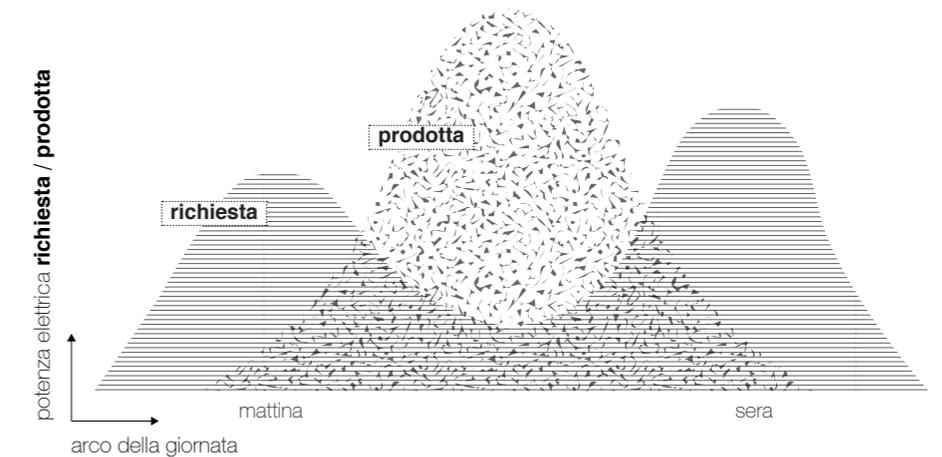
figura 1
Curva del rapporto domanda-offerta dell'energia elettrica nell'arco della giornata

Un impianto PV raggiunge il picco di produzione a metà della giornata circa, mentre il fabbisogno energetico di un edificio residenziale è maggiore in mattinata ed in serata.

Il surplus energetico prodotto (l'area sottesa alla curva di energia prodotta non attraversata dalla curva di energia richiesta) viene immessa nella griglia oppure conservata con sistemi di stoccaggio

nergia BIPV, come per esempio sistemi di stoccaggio a breve e lungo tempo, insieme alla maggiore quantità di superficie attiva per la produzione energetica.

In entrambi gli approcci gli edifici possono rappresentare piccole centrali elettriche inserite in una comunità energetica in cui i flussi energetici non sono gerarchici ed unidirezionali come nei sistemi tradizionali, dalla produzione all'utenza, ma sono più complessi e rientrano nella logica delle Smart Grid⁶.



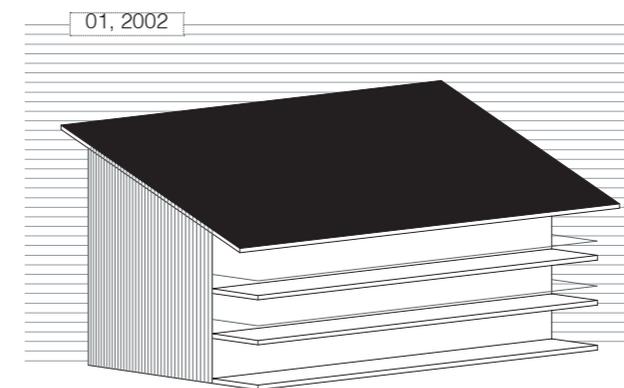
- 01, 2002 / Solar Settlement , Rolf Disch
- 02, 2011 / Casa Solara, Cerfeda Architekten - vedi pag. 164
- 03, 2016 / Complesso residenziale a Zurigo, Karl Viridén + Partner AG - vedi pag. 152
- 04, 2017 / Palazzo Solaris, Huggenbergerfries Architekten - vedi pag. 148
- 05, 2016 / Edificio energeticamente autosufficiente a Brütten, René Schmid Architekten - vedi pag. 150
- 06, 2012 / Palazzo Positivo, Tour Baumanagement AG
- 07, 2018 / MFH Sonnenparkplus, Arento Architektur - vedi pag. 170
- 08, 2018 / 740 Fulham Road, HCL Architects - vedi pag. 168
- 09, 2013 / Licht & Luft, Wamsler Architekten - vedi pag. 160
- 10, 2011 / Holfberg 6/7, Fent Solare Architektur - vedi pag. 162
- 11, 2016 / Condominio Chrüz matt, Mark Rööslì - vedi pag. 166
- 12, 2000 / Rifugio alpino Kesh Hutte, Toni Spirig - vedi pag. 156
- 13, 2013 / EFH Lech am Arlberg, Pichler Bau + Plan GmbH
- 14, 2017 / Complesso Altstetten, Kämpfen für Architektur AG
- 15, 2014 / Kingsgate House, HCL Architects - vedi pag. 154

(a destra e nelle pagine successive)

Evoluzione del concetto di integrazione: dalla copertura inclinata a Sud a linguaggio architettonico

Il percorso evolutivo del BIPV permette di riconoscere differenti modalità di integrazione fotovoltaica in facciata che negli anni recenti hanno identificato nuovi linguaggi architettonici.

Da una prima distinzione del BIPV in forme di integrazione presentata al paragrafo 2.2 *Forme di integrazione e possibili interpretazioni*, in questo paragrafo si vogliono distinguere le *strategie di integrazione individuate dalla ricerca* (Elaborazione propria)



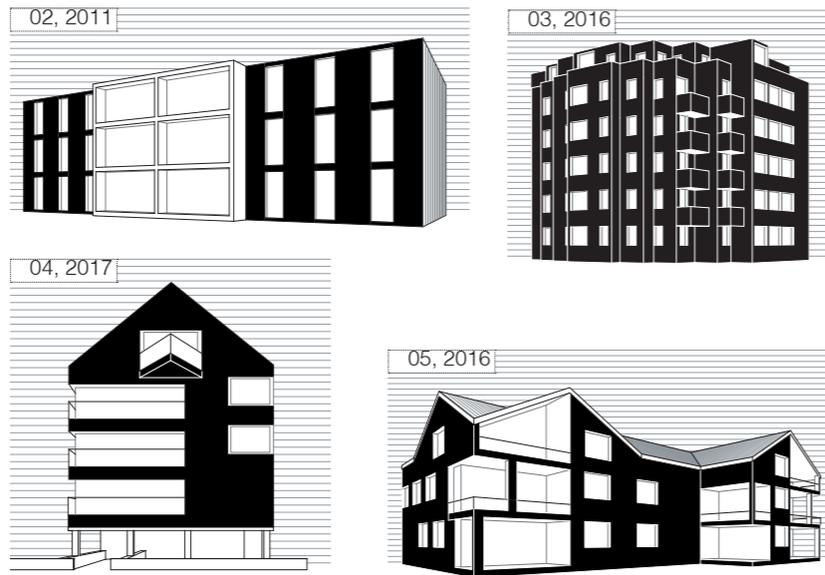
STRATEGIA DI INTEGRAZIONE / ORIENTAMENTI PREFERENZIALI

L'impianto fotovoltaico, integrato e non, veniva posizionato solo secondo gli orientamenti preferenziali che permettevano la massima produzione energetica; per l'emisfero boreale, orientamento Sud (angolo azimutale) ed inclinazione 30° - 35° (angolo di tilt)

STRATEGIA DI INTEGRAZIONE / **TOTALE**

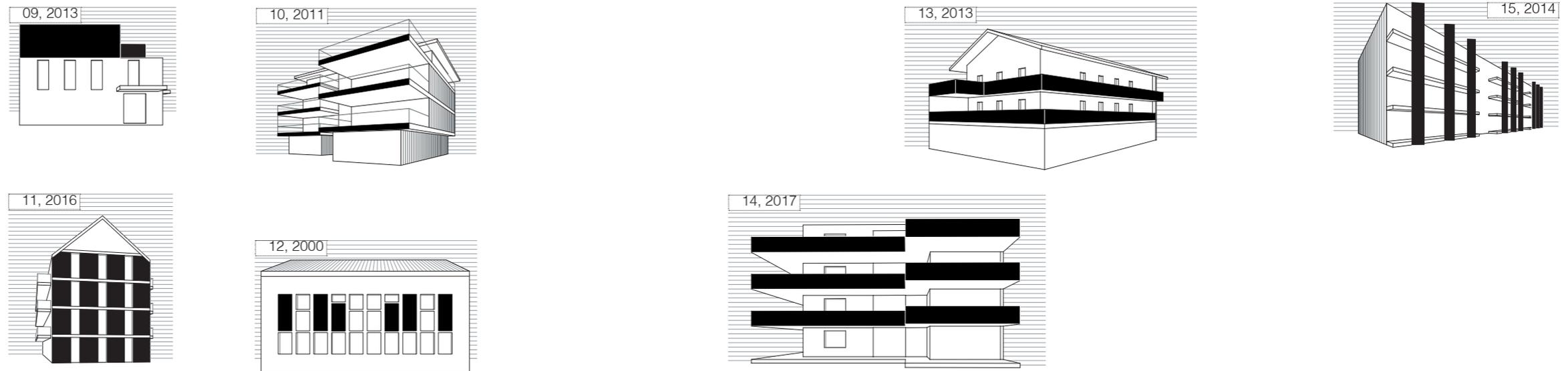
L'impianto fotovoltaico riveste totalmente le facciate, anche su più fronti.

Si ottengono architetture quasi o totalmente autosufficienti dalla rete elettrica che vogliono dimostrare cosa è possibile fare con tale tecnologia, ma non necessariamente vanno considerate come il punto di arrivo a cui tendere.



STRATEGIA DI INTEGRAZIONE / **PUNTUALE**

L'impianto fotovoltaico riveste in maniera puntuale e localizzata delle porzioni di edificio. Risulta la strategia di integrazione più comune attraverso la quale si punta a coprire solo una parte del fabbisogno energetico. La qualità architettonica deriva quindi dalla capacità e sensibilità di saper integrare il materiale PV in una composizione architettonica.



Integrazione totale

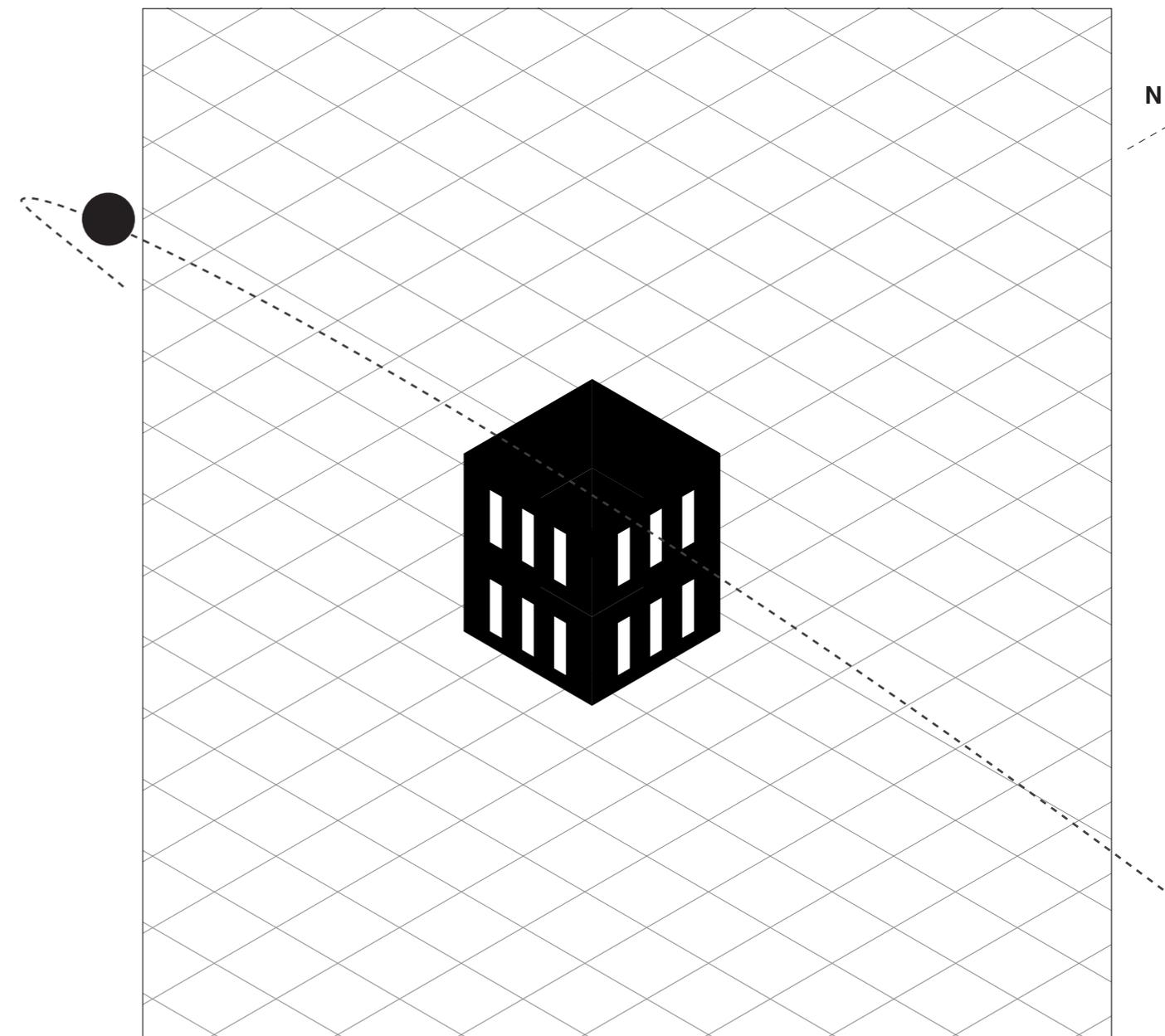
La risposta alla crescente richiesta di edifici più *responsabili* rispetto alle tematiche ambientali non si fa attendere e, nonostante il BIPV fatichi ancora a diffondersi in modo significativo sul territorio europeo, si possono distinguere alcune regioni dove la strategia di integrazione più comune consiste nella totale integrazione dei moduli fotovoltaici sull'involucro.

È la ricerca dell'autosufficienza, quell'approccio innovativo al quale si faceva prima riferimento per rendere il progetto completamente autonomo dall'approvvigionamento energetico. In altri casi, ancora, è la scelta di ridurre quanto possibile il consumo di energia della rete locale aumentando quanto più la produzione in loco.

In Svizzera, ed in particolar modo a Zurigo, è sempre più comune incrociare architetture dagli involucri completamente attivi dove la tecnologia solare viene concepita come un ulteriore fondamento dell'architettura; complice di questa forma mentis è senza dubbio il carattere innovativo in termini di colorazioni, finiture e dimensioni del fotovoltaico integrato che, individuato dalla ricerca e garantito dallo sviluppo industriale, ha avviato quel processo di trasformazione che vede il fotovoltaico acquisire sempre più il carattere di componente sottile, ideale come *pelle* dell'edificio.

Integrazione totale / possibili forme di integrazione

Le soluzioni fotovoltaiche vengono integrate su tutti i componenti opachi dell'edificio, principalmente sugli elementi di chiusura verticale e sugli elementi di protezione.



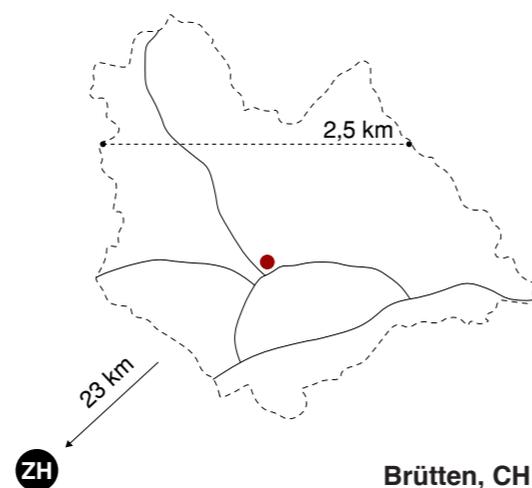
Edificio energeticamente autosufficiente a Brütten

/ documentazione

È a Brütten, un piccolo comune svizzero del Canton Zurigo, che sorge il primo condominio energeticamente autosufficiente al mondo, progettato nel 2016 dallo studio René Schmid Architekten.

La riuscita del progetto è da attribuire all'imprenditore edile Walter Schmid, nonché committente dell'edificio, che fin dall'inizio della sua attività si concentra sulla tecnologia solare e giunge nel 2012 alla realizzazione della Umwelt Arena Schweiz a Spreitenbach, Canton Zurigo, una piattaforma espositiva per la sensibilizzazione della popolazione verso tematiche ambientali. Tra i progetti faro della Umwelt Arena Schweiz risalta il condominio sopraccitato, la cui visibilità è da ascrivere ad un evoluto sistema di produzione, stoccaggio e consumo energetico che lo rende energeticamente autosufficiente: questa soluzione non permette solo di coprire l'intera domanda energetica, ma implica anche che l'edificio possa funzionare senza alcuna alimentazione energetica esterna perché tutta l'energia necessaria è prodotta e consumata in modo autonomo.

Non è difficile immaginare come i progetti che mirano a coprire totalmente il loro fabbisogno energetico debbano includere due principi complementari, da un lato la riduzione della domanda energetica per consumare meno, dall'altro un utilizzo significativo di energia prodotta da fonti rinnovabili, come chiaramente quella solare. In quest'ottica il progetto di René Schmid appartiene senza dubbio a quel grup-

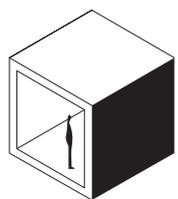


René Schmid Architekten AG

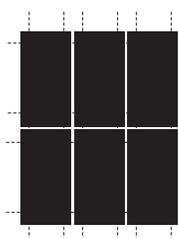
Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2016
Brütten, CH
47°28'23"N
8°40'32" E

Energy Globe Award Svizzera 2018
Norman Foster Solar Award 2016

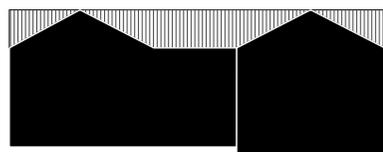




/ forma di integrazione
elemento di chiusura
verticale opaco

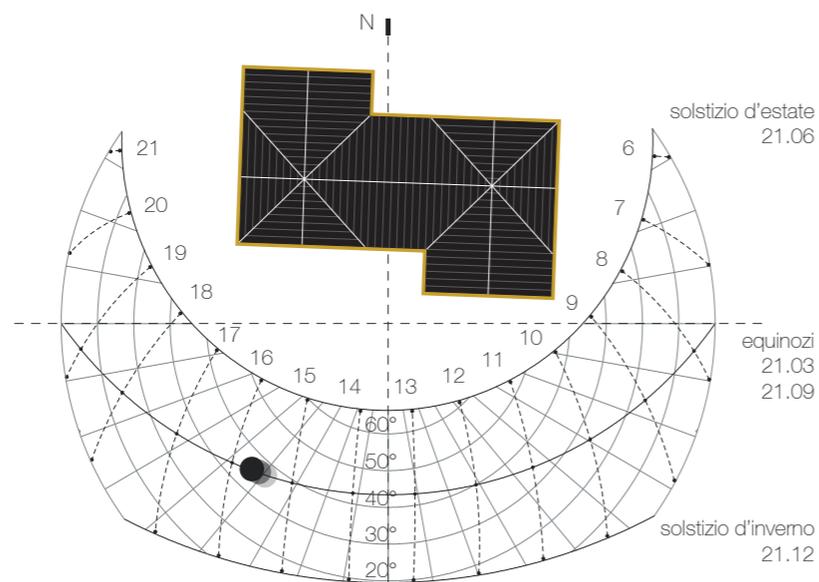


/ sistema tecnologico
facciata ventilata

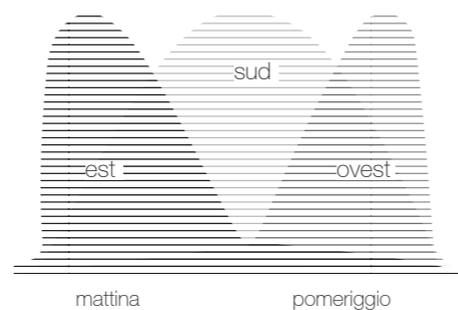


/ strategia di integrazione
integrazione totale

(Elaborazione propria)



/ carta solare
47°28'23"N
8°40'32" E
<https://www.sunearthtools.com/index.php>



/ produzione energetica
giornaliera uniforme
esposizione Sud, Est, Ovest,
Nord

forma di integrazione
chiusura verticale opaca

superficie attiva
470 m² facciata (+ 527 m² copertura)

inclinazione (angolo di tilt)
90°

orientamento (angolo azimutale)
sud / est / ovest / nord

sistema tecnologico
facciata ventilata

produttore
-

tecnologia fotovoltaica
fotovoltaico a film sottile

modulo fotovoltaico
modulo fotovoltaico vetro-film

caratteristica visiva
mimetico

trasparenza
opaco

trattamento colore
sabbatura

potenza nominale
-

efficienza modulo
-

impianti integrativi
pompa di calore geotermica
batterie al litio-ferro-fosfato
(stoccaggio a breve termine)
processo di elettrolisi e conversione
energetica in idrogeno
(stoccaggio a lungo termine)

produzione energetica
27000 kWh/yr facciata
(+65000 kWh/yr copertura)

potenza nominale
47 kWp facciata
(+79.5 kWp copertura)

autoconsumo
100%

po limitato di casi BIPV in cui l'obiettivo è dare prova del massimo potenziale del fotovoltaico integrato in termini di integrazione architettonica e sistema energetico; in questi casi il fotovoltaico integrato assume il ruolo di *pelle* dell'edificio, acquistando come duplice funzione quella di rivestimento. Insieme ai sistemi di accumulo energetico a breve e lungo termine, che suggeriscono quell'approccio innovativo al quale si faceva cenno, nel condominio di Brütten la tecnologia fotovoltaica è integrata su tutto l'involucro e rappresenta al tempo stesso il carattere dominante ed invisibile del progetto. Se l'impianto fotovoltaico integrato in copertura risulta riconoscibile alla vista, i moduli PV integrati in facciata possono tranquillamente essere confusi per tradizionali pannelli di rivestimento dall'aspetto scuro e opaco. Progettare una facciata fotovoltaica con i prodotti che oggi sono disponibili implica inevitabilmente, e fortunatamente, una sintesi tra questioni compositive ed aspetti tecnologici, che in questo caso vengono risolte in un'architettura dal carattere monolitico. I moduli fotovoltaici privi di telaio hanno dimensioni libere e distano gli uni dagli altri pochi millimetri, gli spazi aperti sono garantiti dalle logge che escludono la presenza di componenti aggettanti, i pluviali non sono resi visibili: queste scelte progettuali che da un lato portano ad un'architettura che evoca il concetto di solidità, dall'altro escludono la proiezione di ombre portate sull'involucro, massimizzando la resa dell'impianto. Il carattere omogeneo del fotovoltaico restituisce uniformità ad una facciata che, contrariamente, è fortemente articolata su tutti i fronti. (Schmid, 2016)

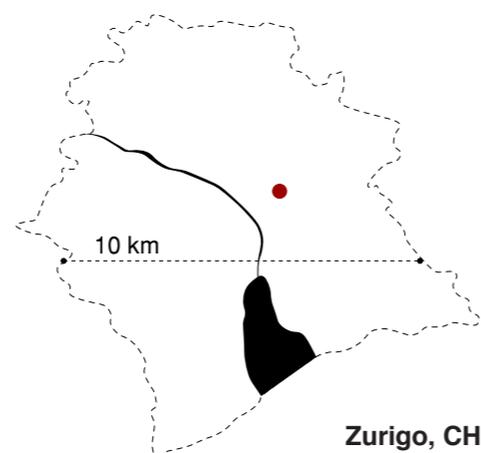
Condominio della Hofwiesenstrasse

/ documentazione

È sempre a Zurigo che ci si può imbattere in un altro esempio di architettura BIPV capace di raccontare la stessa strategia di integrazione. A Unterstrass, nel sesto distretto della città, un edificio residenziale degli anni '80 viene riqualificato nel 2016 con un progetto di ampliamento e di integrazione del fotovoltaico sull'involucro. Questo parallelismo sia territoriale che temporale non è una coincidenza se si considera come gli avanzamenti dell'industria del vetro abbiamo permesso l'uso di componenti vetri anche opachi e rappresenta, invece, quel punto di partenza da cui la letteratura del BIPV inizia ad arricchirsi di architetture che sfruttano le nuove potenzialità del fotovoltaico concependolo come *pelle* dell'edificio.

Rispetto al progetto di nuova costruzione di Brütten firmato René Schmid Architekten, la riqualificazione dell'edificio di Zurigo è il risultato di un progetto pilota pluriennale realizzato da un consorzio privato e finanziato da fondi pubblici⁷ per presentare una strada percorribile per la riqualificazione del patrimonio architettonico svizzero. Anche nell'ambito della riqualificazione, che oggi rappresenta il mercato più esteso per il settore edilizio europeo, concedere al fotovoltaico uno spazio così ampio e determinante per l'immagine di un'architettura può rappresentare una strategia vincente nell'ottica di edifici nZEB.

Il lavoro dell'architetto Karl Viridén contava già un gran numero di progetti *passive house*, ma il progetto della Hofwiesenstrasse ha



Zurigo, CH

7. Il progetto è stato incluso nel programma di punta dell'Ufficio federale dell'energia (UFE) ed è finanziato dal Cantone e dalla città di Zurigo

Karl Viridén + Partner AG

Complesso residenziale
Riqualificazione, 2016

Zurigo, CH

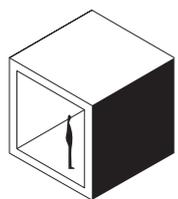
47°22'43"N

8°32'24" E

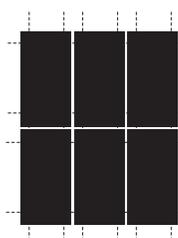
Schweizer Solarpreis 2017

*Prixforix 2018, Award for the most
attractive facade in Switzerland,
Audience Award*

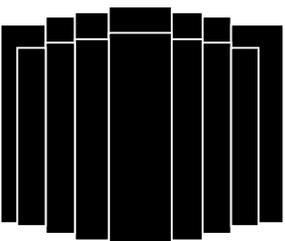




/ forma di integrazione
elemento di chiusura
verticale opaco

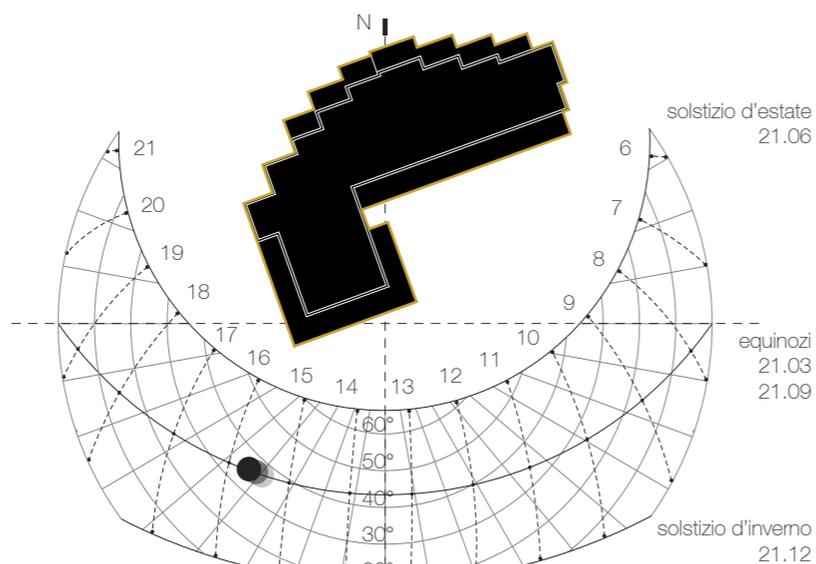


/ sistema tecnologico
facciata ventilata

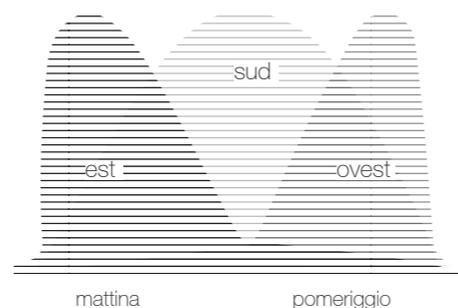


/ strategia di integrazione
integrazione totale

(Elaborazione propria)



/ carta solare
47°22'43"N
8°32'24" E
<https://www.sunearthtools.com/index.php>



/ produzione energetica
giornaliera uniforme
esposizione Sud, Est, Ovest,
Nord

forma di integrazione
chiusura verticale opaca

superficie attiva
1586 m² facciata (+ 165 m² copertura)

inclinazione
(angolo di tilt)
90°

orientamento
(angolo azimutale)
sud / est / ovest / nord

sistema tecnologico
facciata ventilata

produttore
PVP Photovoltaik GmbH

tecnologia fotovoltaica
fotovoltaico monocristallino

modulo fotovoltaico
modulo fotovoltaico vetro-film

caratteristica visiva
mimetico

trasparenza
opaco

trattamento colore
rivestimento satinato e stampa su vetro

potenza nominale
110 Wp/m²

efficienza modulo
-

produzione energetica
82000 kWh/yr facciata + copertura

potenza nominale
159 kWp facciata
(+20 kWp copertura)

autoconsumo
98%

acquistato notorietà perché rientra tra le prime casistiche BIPV in cui la tecnologia solare viene completamente celata da una superficie opaca per potersi inserire tra le scelte progettuali come un qualsiasi altro materiale di rivestimento; questa scelta è da attribuire a requisiti precedentemente dichiarati dal consorzio che imponevano l'uso di pannelli antiriflesso, dal colore omogeneo ed ancoraggi nascosti. Il risultato è un'architettura che si erge imponente all'angolo della Hofwiesenstrasse, riconoscibile da più fronti per la composizione articolata della facciata ed il colore grigio-verde dei moduli fotovoltaici che, seppur mimetici rispetto alla tecnologia fotovoltaica tradizionale, risaltano il contrasto con l'ambiente circostante.

A differenza del progetto di René Schmid, dove un elaborato sistema di produzione e stoccaggio lo hanno reso il primo edificio ad poter funzionare senza alcuna alimentazione energetica esterna, l'involucro fotovoltaico del condominio di Zurigo appartiene alla logica delle *active house* e suggerisce l'approccio conservativo, dove gli edifici che ottengono un bilancio energetico positivo si inseriscono in un sistema di distribuzione energetico bidirezionale che permette loro di vendere il surplus di energia prodotta in loco ed immetterla nella rete elettrica locale. (Viridén, 2016)

I progetti precedentemente citati potrebbero suggerire a primo impatto una visione in cui la città del futuro sarà rivestita di pannelli fotovoltaici colorati che, quali più lucidi, quali più opacizzati, andranno a sostituire tutti gli altri materiali di rivestimento; questa visione invece non appartiene né agli obiettivi del Green Deal Europeo, né, tantomeno, alle ambizioni di chi sostiene il BIPV. Da un lato, infatti, i programmi del Green Deal Europeo prevedono una riduzione dei consumi energetici e di conseguenza delle emissioni di CO₂ prodotte dagli edifici, condizione che, però, non implica la necessità di rivestire completamente gli edifici di fotovoltaico, bensì coprire una domanda energetica già precedentemente ridotta; dall'altro il *Building Integrated Photovoltaics*, che vuole essere al tempo stesso un componente edilizio, un sistema tecnologico e soprattutto una visione progettuale, suggerisce una sintesi tra architettura e tecnica in cui il fotovoltaico sa accrescere il valore del progetto di architettura quando integrato in qualsiasi sua forma e non necessariamente quando prevale sul totale.

In questa sede, quindi, è importante fare chiarezza e riconoscere questi esempi come tentativi sperimentali capaci di dimostrare la massima potenzialità del BIPV per favorirne l'accettazione nel progetto di architettura, ma non vanno intesi come un approccio universalmente valido.

Integrazione puntuale

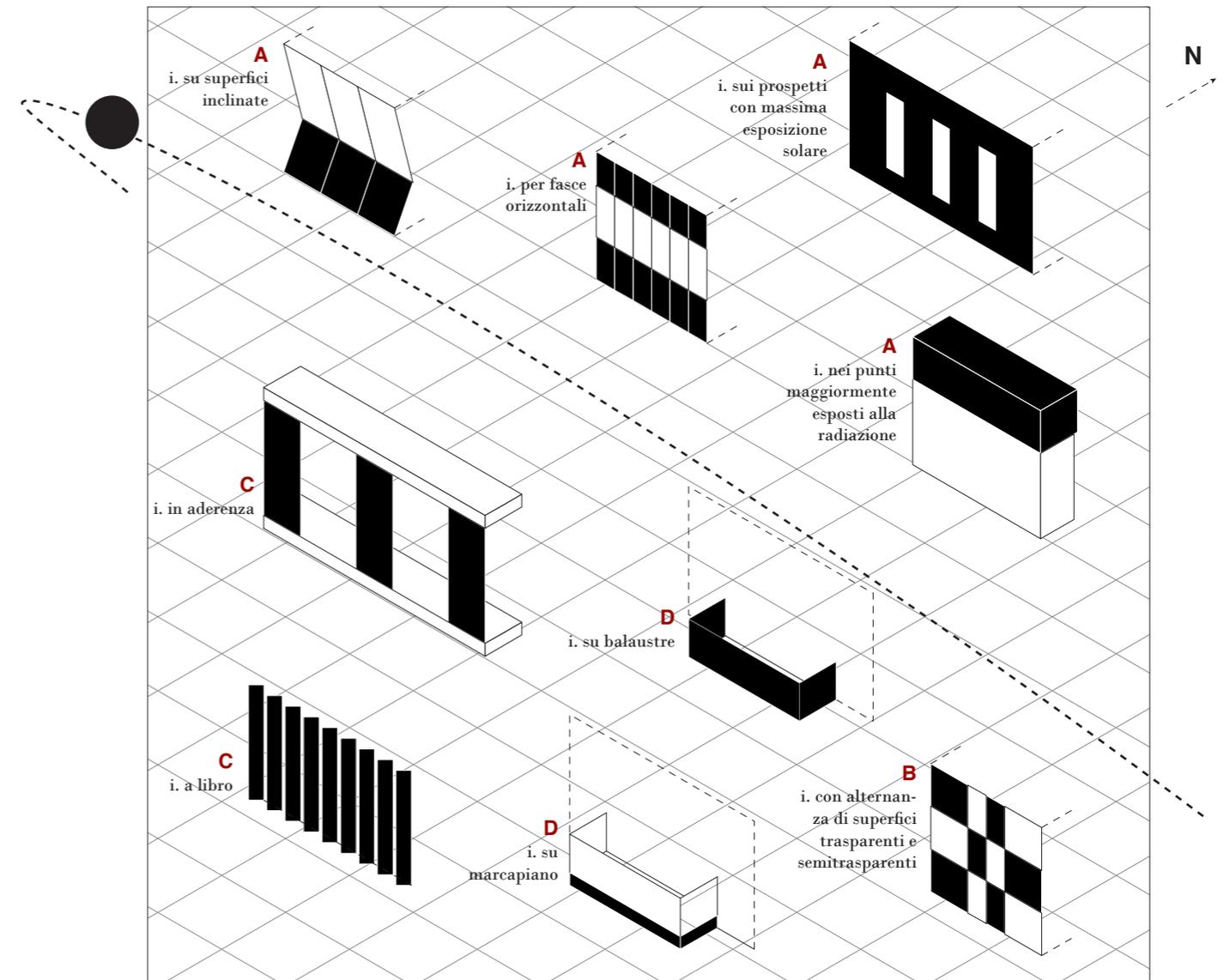
Nella maggior parte dei casi la letteratura BIPV conta di esempi in cui il fotovoltaico viene integrato su superfici meno estese, senza per questo perdere di valore. Si entra in quella dinamica maggiormente diffusa in cui il target energetico di riferimento non è il bilancio energetico positivo, ma la produzione di una quota di energia sufficiente a coprire parte del consumo energetico⁸.

Seguendo questa logica si possono individuare altre strategie di integrazioni in cui il fotovoltaico viene integrato sulle superfici maggiormente esposte alla radiazione solare ma continua a garantire un'elevata qualità architettonica; dovendo necessariamente rapportarsi con altri materiali, la riuscita del progetto è ancor di più vincolata alla sensibilità del progettista che, prima di tutto, deve essere capace di accettare concretamente il fotovoltaico come un nuovo materiale per la progettazione per poterlo integrare nella composizione dell'architettura.

8. Nonostante le direttive 2010/31/UE, 2018/844/UE e la Legge sul Clima implicano strategie a lungo termine per ridurre le emissioni dell'UE e rendere gli edifici nZEB, nessuna direttiva europea dichiara una soglia minima di energia rinnovabile che gli edifici devono produrre in loco

Integrazione puntuale / possibili forme di integrazione

- A** Elemento di chiusura verticale opaco
- B** Elemento di chiusura verticale trasparente
- C** Elemento di schermatura solare
- D** Elemento di protezione



Soluzioni classificabili nella stessa strategia di integrazione e stessa forma di integrazione conducono comunque ad esiti differenti, perché devono essere intesi solo come gli approcci che di volta in volta vengono calati nei singoli progetti.

Kingsgate House

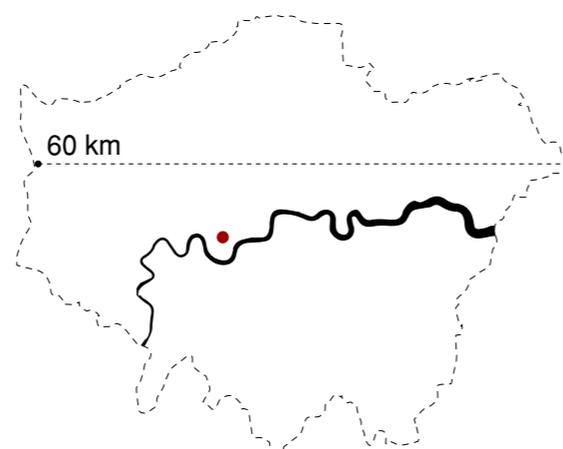
/ documentazione

Percorrendo la King's Road di Londra ci si imbatte nella Kingsgate House, un condominio residenziale firmato HCL Architects costruito sull'impronta dell'edificio preesistente e completato nel 2014.

Progettato per ospitare 43 unità abitative economicamente accessibili, il complesso gode di importante visibilità su strada e con i suoi sei piani fuori terra domina in altezza il contesto urbano. Il progetto rientra pienamente tra quelle architetture descritte in precedenza, in cui il fotovoltaico integrato che copre porzioni ridotte è ugualmente frutto della progettazione architettonica; il merito del progetto che va riconosciuto in questa sede di analisi risiede nella capacità del progettista di aver trasformato dei requisiti tecnici di partenza, quali il livello 4 del *Code for Sustainable Homes*⁹ e l'utilizzo di almeno il 20% di energia rinnovabile, in strategie progettuali di successo.

I componenti BIPV integrati sui fronti Sud-Ovest e Sud-Est assumono il triplice scopo di impianto fotovoltaico, dispositivo di privacy e schermature solari orientate verso Sud in un progetto che già di per sé ambisce ad integrare un'architettura contemporanea in un contesto urbano dettato dalla terracotta e dagli stucchi bianchi delle ville vittoriane.

L'esito è un edificio che al tempo stesso si distingue ma si integra nell'ambiente costruito per proporzioni e cromatismo. Rispetto agli esempi trattati in precedenza dove il fotovoltaico viene celato da superfici vetrate colorate,



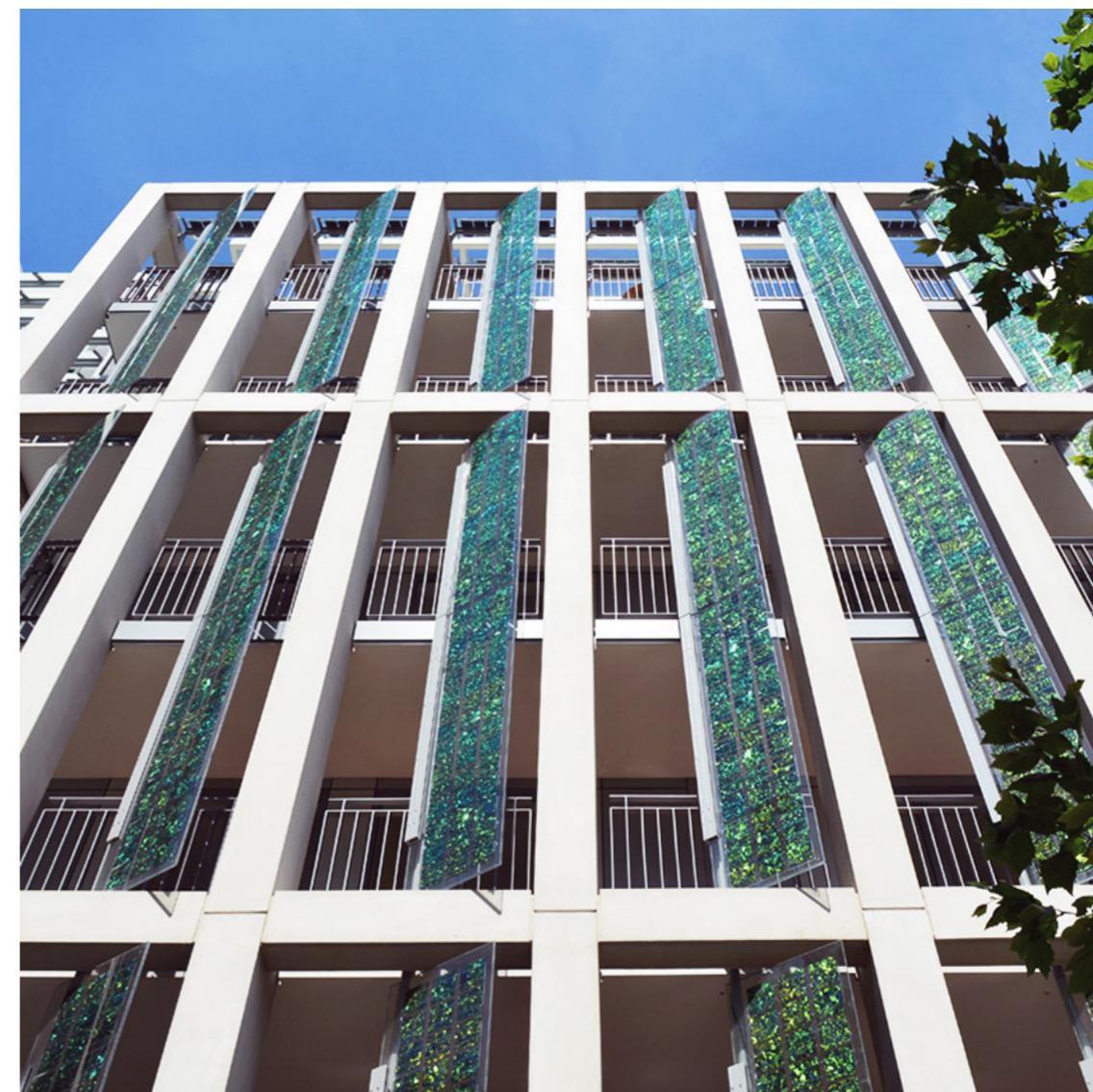
Londra, UK

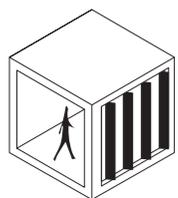
9. Introdotto in Inghilterra nel 2007 come standard nazionale volontario, il *Code for Sustainable Homes* stabilisce un unico quadro di riferimento con standard ambientali più elevati. Vengono valutate nove categorie di progettazione, tra cui la produzione energetica e le emissioni di CO₂.

HCL Architects

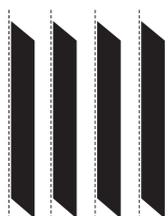
Complesso residenziale
Nuova costruzione, 2014
Londra, UK
51°30'26"N
0°07'39" E

*Best Affordable Housing Scheme at
24 Housing Awards 2014*

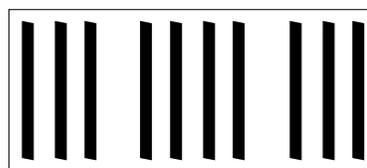




/ forma di integrazione
elemento di schermatura
solare

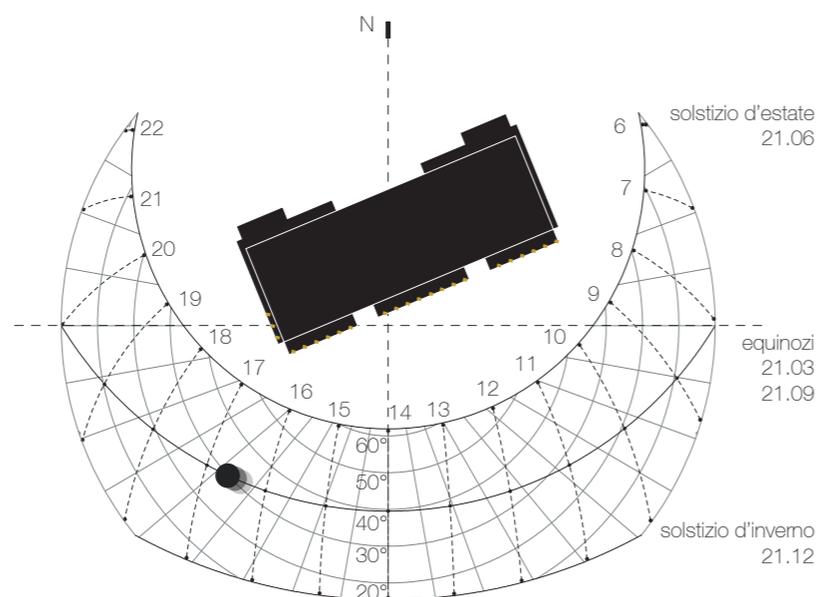


/ sistema tecnologico
sistema di schermatura
solare fotovoltaica
Shadowvoltaic fornito
da Colt



/ strategia di integrazione
integrazione parziale

(Elaborazione propria)



/ carta solare
51°30'26"N
0°07'39" E
<https://www.sunearthtools.com/index.php>



/ produzione energetica
giornaliera uniforme
esposizione Sud

forma di integrazione
schermatura solare

superficie attiva
188 m²

inclinazione
(angolo di tilt)
90°

orientamento
(angolo azimutale)
sud

sistema tecnologico
sistema *Shadowvoltaic* di Colt

produttore
Romag

tecnologia fotovoltaica
fotovoltaico policristallino

modulo fotovoltaico
modulo fotovoltaico vetro-vetro

caratteristica visiva
fotovoltaico riconoscibile

trasparenza
semitrasparente

trattamento colore
nessuno

potenza nominale
-

efficienza modulo
17,60-15,20%

produzione energetica
13145 kWh/yr

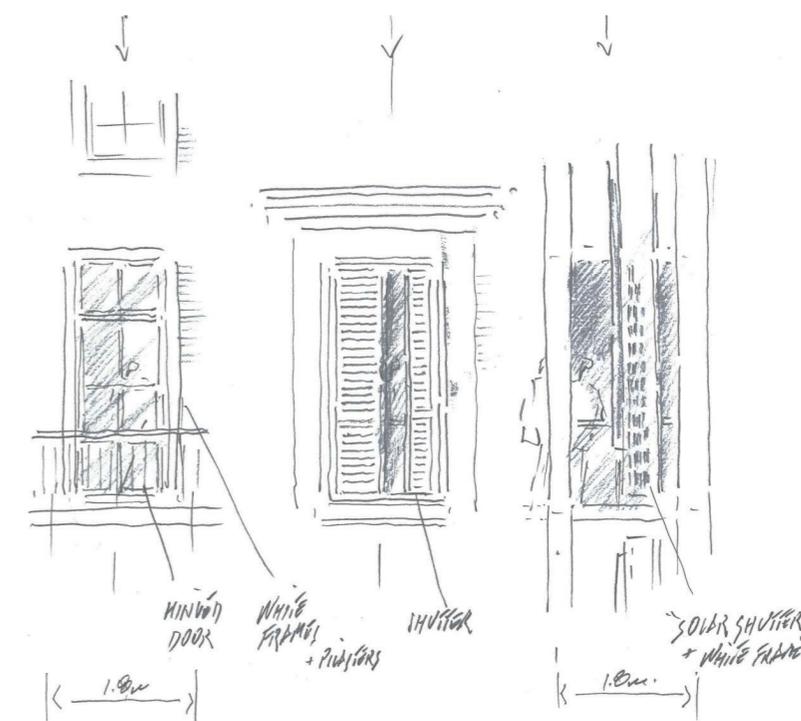
potenza nominale
- kWp

autoconsumo
20%

10. La citazione dell'architetto Billie Lee fa riferimento alle *Fulham Houses*, altro progetto BIPV di firmato HCL Architects

l'architetto Billie Lee sostiene l'onestà dei materiali: *"We enjoy that the building's technology and ecology are an intrinsic part of the architecture, not hidden or disguised, but celebrated and enjoyed"* ¹⁰ (HCLA).

Le celle fotovoltaiche di tonalità verde-oro integrate nelle schermature verticali a doppia altezza sono visibilmente riconoscibili e rafforzano la composizione della facciata principale, un corpo avanzato rispetto al filo esterno dell'edificio progettato per includere e proteggere gli spazi esterni privati ed ospitare le schermature solari.



(sopra)
Sketch di progetto fornito da HCL Architects

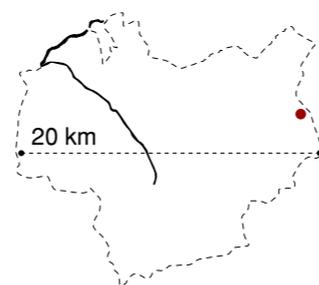
Kesh Hutte

/ documentazione

È sicuramente importante riconoscere nella riuscita di questi progetti BIPV il forte grado di avanzamento tecnologico dell'ultimo decennio, accompagnato anche da direttive energetiche più stringenti, ma questi elementi da soli non sono sufficienti per elaborare strategie di integrazione sempre raffinate se non sono supportati da una visione progettuale olistica.

A supporto di questa affermazione un salto temporale di vent'anni ci riporta in Svizzera, sulle Alpi dell'Albula dove alla quota di 2625 metri in un'area raggiungibile solo a piedi viene commissionato all'architetto Toni Spirig il progetto per un rifugio alpino, completato nell'estate del 2000. In questo caso la necessità di produrre in modo autonomo l'energia necessaria per il funzionamento¹¹ ha guidato l'architetto verso un'architettura solare dal carattere fortemente sperimentale per il suo tempo, che combina soluzioni attive e passive.

All'inizio del millennio era ancora impensabile discutere di celle fotovoltaiche colorate o pannelli fotovoltaici mimetici, ma laddove in altri contesti la produzione energetica era (e lo è ancora) richiesta ad un impianto PV standard, in Kesh Hutte diventava una questione progettuale inseparabile dall'architettura, che si è tradotta in una sperimentazione di fotovoltaico integrato in facciata e copertura. Il fronte esposto a Sud segue una composizione chiara in cui il rivestimento in legno funge da grande cornice per l'immagine della facciata e racchiude una rigorosa griglia di aperture distribuite su due



Bergün Filisur, CH

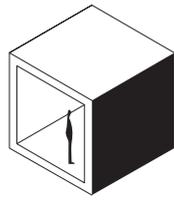
11. L'energia necessaria all'edificio era a carico del proprietario, il Club Alpino Svizzero CAS

Toni Spirig

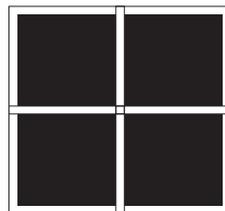
Rifugio alpino
Nuova costruzione, 2000
Bergün Filisur, CH
46°37'30" N
9°45'59" E

Schweizer Solarpreis 2001

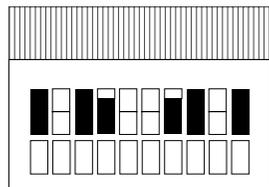




/ forma di integrazione
elemento di chiusura
verticale opaco

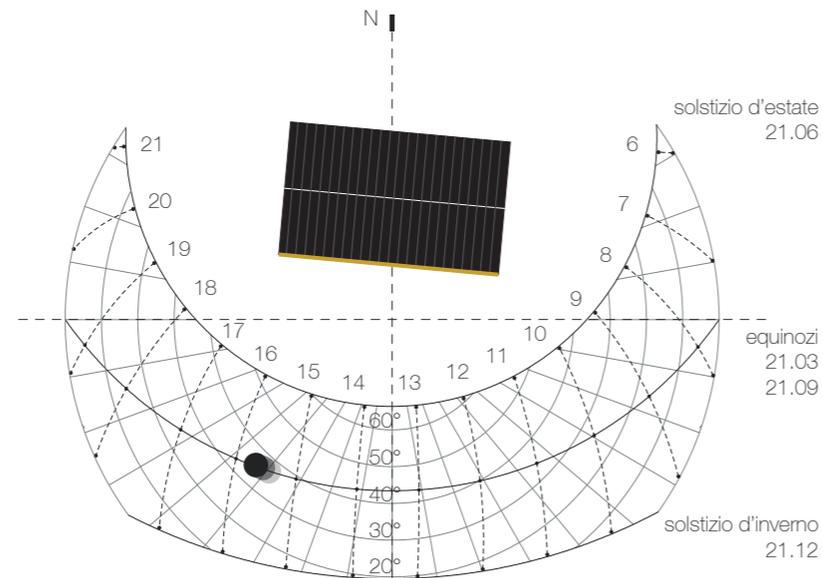


/ sistema tecnologico
moduli intelaiati



/ strategia di integrazione
integrazione parziale

(Elaborazione propria)



/ carta solare
46°39'47" N
8 9°37'58" E
<https://www.sunearthtools.com/index.php>



/ produzione energetica
giornaliera uniforme
esposizione Sud

forma di integrazione
chiusura verticale opaca

superficie attiva
21,7 m²

inclinazione
(angolo di tilt)
90°

orientamento
(angolo azimutale)
sud

sistema tecnologico
moduli intelaiati

produttore
-

tecnologia fotovoltaica
fotovoltaico monocristallino

modulo fotovoltaico
modulo fotovoltaico standard

caratteristica visiva
fotovoltaico riconoscibile

trasparenza
opaco

trattamento colore
nessuno

potenza nominale
-

efficienza modulo
-

produzione energetica
3100 kWh/yr

potenza nominale
2,7 kWp

autoconsumo
76%

livelli. La produzione di energia elettrica e termica è affidata a pannelli fotovoltaici e collettori solari privi di alcuna caratteristica formale ma abilmente integrati nel disegno della facciata che, in combinazione con quelli integrati sulla falda, permettono al rifugio un autoconsumo energetico del 76%.

4.4 ALTRE TRAIETTORIE DI RICERCA

L'ampio scenario appena descritto ha voluto delineare alcune tra le principali traiettorie di innovazione verso cui tende la ricerca internazionale, approfondendo le riflessioni in merito alle traiettorie di lavoro intraprese, alle strategie progettuali adottate, alle relazioni che governano il rapporto tra il progetto di architettura e l'integrazione fotovoltaica, che nella quasi totalità dei casi caratterizza il mercato delle costruzioni *ex novo*.

A fronte di questo panorama BIPV in cui il fotovoltaico e le sue possibili applicazioni rappresentano il carattere dominante, le riflessioni che emergono in questa sede entrano nel merito di ulteriori traiettorie di ricerca considerate altrettanto potenziali per il percorso di innovazione intrapreso dal BIPV.

In aggiunta alle nuove visioni estetizzanti del BIPV che rappresentano oggi il carattere innovativo più comunemente investigato, in questa sede si vogliono proporre angolature differenti per dare spazio a nuovi spunti di riflessione. È stato già ampiamente dimostrato da precedenti studi che il *Building Integrated Photovoltaics* aumenti il valore di un edificio sotto molteplici aspetti, dalla qualità architettonica alla componente economica (ETIP 2019), (PVPS 15 2020), ma è necessario prevedere una capacità di lettura complessiva e profonda del progetto che sappia farsi carico di ulteriori componenti di innovazione.

L'innovazione è unanimemente considerata un elemento fondamentale per il rilancio del settore delle costruzioni, sia per la riqualificazione del patrimonio edilizio che per la progettazione *ex novo* ma, al contempo, rappresenta un concetto estremamente ampio e dal carattere molteplice che vede nella capacità di attivare fruttuose cooperazioni tra tutti i soggetti che operano nella filiera, dalla manifattura ai sistemi di gestione, un modello di processo edilizio fortemente innovativo. (Campioli, 2011).

Per semplicità e chiarezza, però, si rimandi il tema del *processo* a successive sedi del lavoro di tesi¹ e si consideri, quindi, come primo assunto che l'innovazione nasce da due fattori, talvolta compresenti, che Nicola Sinopoli² chiama *motori dell'innovazione*: da un lato la disponibilità di nuove conoscenze scientifiche, la *research push* e dall'altro la volontà di rispondere ad un'esigenza, la *demand pull*. (Sinopoli, Tatano, 2002)

Seguendo questa logica, è possibile riconoscere nell'urgenza di contenimento dei consumi energetici degli edifici e nella più generale ottica di sostenibilità dell'ambiente costruito una solida *demand pull* che negli ultimi quarant'anni ha determinato una forte spinta a modificare i criteri della progettazione, imponendo requisiti prestazionali da rispettare. La crisi petrolifera del '73 ed il successivo rincaro dei prezzi del petrolio hanno messo in crisi il settore energetico, un'industria fondamentale per i Paesi Europei e gli Stati Uniti, ponendo le basi per le prime riflessioni sulla dipendenza da fonti energetiche di disponibilità limitata. Queste considerazioni sono state successivamente tradotte nella prima definizione di *sviluppo sostenibile* che, presentata nel Rapporto Brundtland del 1987, identifica uno sviluppo più consapevole della limitatezza delle risorse naturali e più

1. Si consulti il paragrafo 4.5 *Approcci interdisciplinari*

2. Nicola Sinopoli, docente ordinario di tecnologia dell'Architettura all'Istituto Universitario di Architettura di Venezia, svolge attività di ricerca nei settori del marketing strategico, dell'innovazione e sperimentazione tecnologica, del processo edilizio e della normativa tecnica.

attento ai consumi energetici; (Brundtland 1987) l'interesse verso le questioni ambientali che si è riversato in modo graduale sul settore edilizio a partire dagli anni '70 – '80 viene definito *ondata sostenibile*, quell'arco temporale tuttora attuale in cui si registra un cresciuto interesse verso il contenimento dei consumi energetici, l'orientamento degli edifici, la limitazione della produzione di rifiuti, l'impiego di materiali e tecniche a basso impatto ambientale.

(L'attuale interesse verso il contenimento dei consumi energetici non è più strettamente vincolato alla scarsità delle risorse fossili, ma è dettato dalla necessità di ridurre l'emissione dei gas a effetto serra che l'utilizzo di queste stesse risorse fossili libera nell'atmosfera e sta causando il drastico aumento della temperatura media globale).

Tornando all'integrazione del fotovoltaico è chiaro come, decostruendo questo ampio scenario di sostenibilità dell'ambiente costruito ed evidenziando la necessità di un maggiore uso di risorse rinnovabili nel settore delle costruzioni, **la trasformazione del prodotto PV, da modulo fotovoltaico standard a componente progettuale proposto dal BIPV, sia il frutto di un'innovazione tecnologica nata dal bisogno di costruire edifici più efficienti continuando a produrre architettura.**

Come anticipato, la principale traiettoria di innovazione attualmente intrapresa risiede nell'aspetto finale del prodotto e nel relativo binomio forma – prestazione, ma il ruolo della ricerca non può limitarsi al solo repertorio formale e, confrontandosi anche con filoni trasversali, deve investigare altri aspetti innovativi. È a questo proposito che l'analisi dello stato dell'arte di questo lavoro di tesi varca i confini della trattazione canonica del *Building Integrated Photovoltaics*, per entrare nel merito di altre possibili interpretazioni e riflessioni.

Si consideri come punto di partenza lo slittamento tematico dell'integrazione fotovoltaica in facciata, ed in senso lato il rapporto con la componente impiantistica e l'uso di risorse rinnovabili, dal mercato delle nuove costruzioni a quello della riqualificazione.

Questa riflessione nasce dalla constatazione che la dotazione di un sistema di facciata BIPV, che al tempo stesso contribuisca al miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio e rappresenti una soluzione raffinata e coerente con il progetto di architettura, carat-

terizza in netta prevalenza i progetti di nuova costruzione rispetto a quello della riqualificazione³.

Rispetto, quindi, agli scenari descritti nella trattazione precedente, la sezione attuale mira a predisporre una panoramica dove collocare quegli interventi di riqualificazione che, seppur non centrali nella più circoscritta visione del *Building Integrated Photovoltaics* comunemente proposta, permettono di costruire ulteriori relazioni tra il tema della riqualificazione, del fotovoltaico integrato e delle relazioni con altri sistemi impiantistici, al fine di far emergere maggiori riflessioni.

Tra queste riflessioni si colloca una considerazione tecnica dal carattere elementare: di tutta la radiazione solare che investe le celle fotovoltaiche di un pannello PV, nella migliore delle ipotesi solo il 20% viene trasformato in energia elettrica mentre la restante parte è calore. (bipv.ch) Secondo le nozioni di termodinamica, però, il calore non è altro che energia termica che si propaga per l'effetto di una differenza di temperatura e, come tale, potenzialmente impiegabile nell'ottica del Green Deal Europeo e di edifici nZEB come ulteriore fonte di energia. Rispetto a questa logica di produzione energetica, le analisi prestazionali effettuate negli anni sulla tecnologia fotovoltaica hanno sempre dimostrato come quel calore generato in prossimità delle celle fotovoltaiche ne abbatta drasticamente l'efficienza elettrica, motivo per il quale gli impianti fotovoltaici necessitano di una camera di ventilazione retrostante che ne allontana il calore o, nei casi di sperimentazione, di altri strumenti di raffrescamento. (Makki A., Omer S., Sabir H., 2014) (Dwivedi et al. 2019).

È interessante constatare come il cambio di prospettiva dal concetto di *calore* a quello di *energia termica* permetta di passare da un'accezione negativa (il calore che riduce le prestazioni energetiche) ad una positiva (l'energia termica guadagnabile); è così che, parallelamente ai sistemi di raffrescamento delle celle PV, la letteratura sulla tecnologia fotovoltaica si arricchisce di un elevato numero di investigazioni sui sistemi PVT, tecnologia ibrida (fotovoltaico-termico) che recupera il calore prodotto dalla radiazione solare con il duplice obiettivo di migliorare le prestazioni energetiche delle celle fotovoltaiche da un lato e produrre energia termica dall'altro. (Diwania S. et al., 2019)

L'analisi dello stato dell'arte delle soluzioni PV, TH⁴ e PVT⁵ delinea

3. La prevalenza di involucri edilizi verticali BIPV nel settore residenziale di nuova costruzione rispetto quello di riqualificazione è comprovabile attraverso la consultazione delle principali piattaforme di ricerca a scopi divulgativi sul tema BIPV, tra cui *bipv.ch* (bipv.ch) e *solararchitecture.ch* (solararchitecture.ch)

4. La sigla TH sta per *thermal* che, inserita nel presente contesto, indica i sistemi solari termici

5. La letteratura su tali tecnologie è stata ricostruita sulla base di ricerche in rete effettuate tramite piattaforme di ricerca specializzate, website di produttori di fotovoltaico, brevetti depositati nella piattaforma OrbitExpress

una generale tendenza ad affrontare il tema della produzione di energia termica solo in termini di prodotti standard disponibili sul mercato (sistemi *applied*, applicati e, pertanto, esterni alle logiche di sistemi integrati) o in riferimento a soluzioni brevettabili depositate (dove però l'interesse risiede esclusivamente nel principio di funzionamento energetico escludendone una visione d'insieme della soluzione, ovvero in assenza di ogni riferimento al processo costruttivo, al mercato di destinazione, all'aspetto della soluzione).

Nell'ambito di soluzioni fotovoltaiche integrate, infatti, il miglioramento delle prestazioni energetiche è principalmente dettato da una ricerca sempre più specializzata verso la tecnologia vetro-fotovoltaico, accompagnata dal sistema costruttivo della parete ventilata per la rimozione del calore prodotto, mentre il recupero dell'energia termica e l'adozione di sistemi ibridi sono riconoscibili in un numero limitatissimo di esempi BIPV.

È da questa considerazione che l'interesse emerso in questa sede verte verso quegli esempi di riqualificazione del patrimonio edilizio che mirano al tempo stesso ad una maggiore integrazione della componente impiantistica nel progetto di architettura e ad una maggiore integrazione tra le diverse componenti impiantistiche, nell'ottica di una continua innovazione progettuale⁶.

Ai fini di una corretta lettura, però, è importante sottolineare che non tutti i casi studio selezionati raggiungono l'obiettivo dichiarato, ma rappresentano un utile strumento di critica e riflessione a supporto del più generale obiettivo del presente lavoro: **dimostrare come il progetto di architettura, che sia relativo ad una nuova costruzione o ad un retrofit, dovrà necessariamente ospitare ed integrare in misura maggiore la componente impiantistica e che questa necessità, quando sfruttata, può solo essere trasformata in valore aggiunto.**

6. Eventualmente verranno analizzati anche casi di nuova costruzione, qualora possano fornire anch'essi spunti di riflessione riguardo la riqualificazione del patrimonio edilizio e l'integrazione tra componenti impiantistiche e progetto di architettura

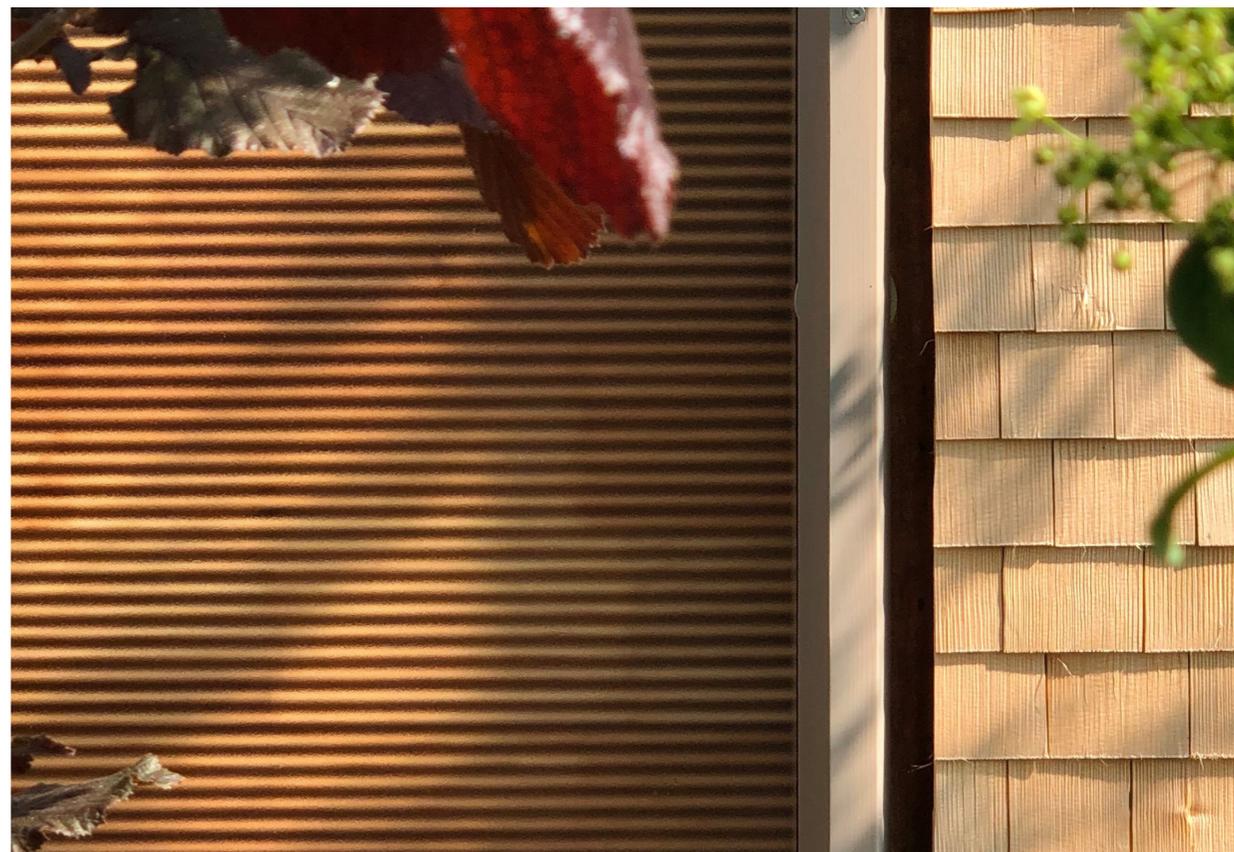
Lucido Solar AG

/ documentazione

Sfruttare appieno le potenzialità della radiazione solare per produrre al tempo stesso energia termica ed elettrica è aspetto distintivo dei progetti di Giuseppe Fent di Fent Solare Architektur, architetto appartenente al contesto svizzero tedesco, amministratore delegato della società Lucido Solar AG ed ideatore dei brevetti Lucido: questo carattere polivalente comporta che i prodotti in commercio sotto il marchio Lucido Solar AG siano le stesse soluzioni PVT adottate nei progetti firmati Fent Solare Architektur, precedentemente sviluppate da Giuseppe Fent.

La scelta non casuale di una figura che al tempo stesso incarna la sfera dell'architettura e quella della tecnologia solare sottolinea quella visione olistica del progetto in cui composizione e tecnologia si integrano in maniera indissolubile; da un lato le competenze proprie di un architetto sono necessarie per approcciarsi alla dinamica BIPV, dall'altro serve apertura mentale da parte dello stesso nei confronti di una soluzione che, di fatto, rappresenta un sistema impiantistico.

(a destra)
fotografia del componente
Lucido Solar (a sinistra) e
relazione con altri materiali
(fonte: Lucido Solar AG)



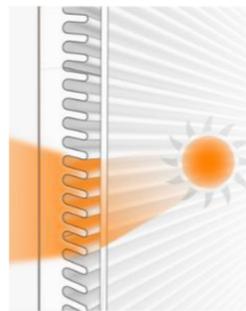
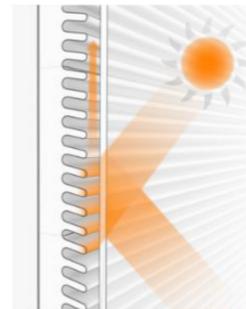
La soluzione brevettata nel 2017 prende il nome di *Lucido* e si presenta in tutte le sue versioni come un sistema di facciata solare che simula il principio di una serra: dall'esterno verso l'interno, il sistema si compone di un vetro esterno altamente trasparente per permettere il passaggio della radiazione solare, un elemento assorbitore in legno fresato distanziato di pochi centimetri ed una parete isolante.

Da un lato, per i principi della fisica, la radiazione solare incidente sulla superficie vetrata resta intrappolata nell'intercapedine d'aria, dall'altro il sistema adotta in scala ridotta i principi della bioclimatica sfruttando a suo vantaggio la variazione dell'altezza solare lungo l'arco temporale di un anno. La geometria in lamelle del pannello in legno fresato è studiata seguendo l'angolo di incidenza dei raggi solari, motivo per cui durante l'inverno, quando il sole è più basso, la radiazione solare bloccata dal vetro raggiunge i punti più prossimi al componente isolante e, riscaldandolo, ne migliora le prestazioni termiche; le lamelle intercettate dai raggi solari immagazzinano il calore e creano una zona tampone temperata che riduce ulteriormente le dispersioni termiche e permette la riduzione in spessore dell'isolante termico. Durante il periodo estivo la posizione del sole è alta ed i raggi solari, che vengono prima parzialmente deviati dal vetro per l'angolo di incidenza ridotto, sono successivamente intercettati dalle lamelle che schermano il componente isolante e permettono all'aria surriscaldata di muoversi per convezione verso l'alto.

Seppur applicati per la realizzazione di un componente di facciata e non nella progettazione dell'edificio, questi concetti rientrano appieno tra strategie solari passive largamen-

(a destra) rappresentazione schematica de funzionamento base di *Lucido*: in virtù della sua geometria, il pannello in legno fresato scherma lo strato isolante durante l'estate (sopra); in inverno, le lamelle del pannello in legno intercettate dai raggi solari immagazzinano il calore e creano in tal modo una zona tampone temperata (sotto)

(sotto) rappresentazione del componente *Lucido*. Da sinistra verso destra: il componente isolante, il pannello in legno fresato, l'intercapedine d'aria ed il vetro esterno



Estratto del brevetto europeo n. EP3136016B1 della soluzione analizzata
Hybrid solar collector and method for the operation thereof
 (fonte: OrbitExpress)



(11) EP 3 136 016 A1

(12) EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
01.03.2017 Patentblatt 2017/09

(51) Int Cl.:
F24J 2/04 (2006.01) H02S 40/44 (2014.01)

(21) Anmeldenummer: 15405053.8

(22) Anmeldetag: 25.08.2015

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
MA

(71) Anmelder: Lucido Solar AG
9500 Wil (CH)

(72) Erfinder: Fent, Giuseppe
CH-9515 Hosenruck (CH)

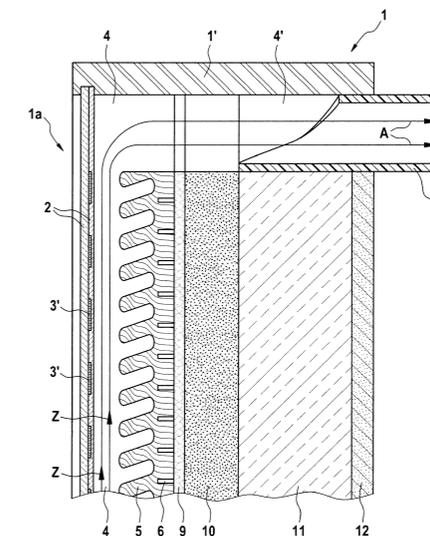
(74) Vertreter: Frauenknecht, Alois J. et al
PPS Polyvalent Patent Service AG
Bahnhofstrasse 12
6403 Küssnacht am Rigi (CH)

(54) HYBRID-SOLARKOLLEKTOR SOWIE VERFAHREN ZU DESSEN BETRIEB

(57) Ein Hybrid-Solarkollektor (1) für den Einbau in Hausfassaden nutzt die eingestrahlte Sonnenenergie zur verzögerten Wärmeinleitung in die Wohnungswände. Die hinterlüftete zumindest opake Abdeckung (2) enthält PV-Elemente (3') zur Stromerzeugung, während die im Luftspalt (4) zwischen dem Kollektor (5) und der Abdeckung (2) erwärmte Luft (A) durch eine Wärmepumpe

(80) abgesogen und vorzugsweise zur Warmwasseraufbereitung- und Speicherung genutzt wird. Die gezielte Luftführung und die Wärmerückgewinnung sind Bestandteil eines Betriebsverfahrens. Das-System ist so aufgebaut, dass es auch in bekannten thermischen Solarzellen mit einfallswinkelselektiver Struktur nachrüstbar ist.

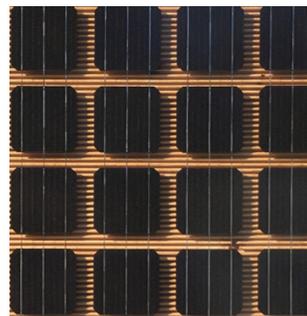
Fig. 1



Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

EP 3 136 016 A1

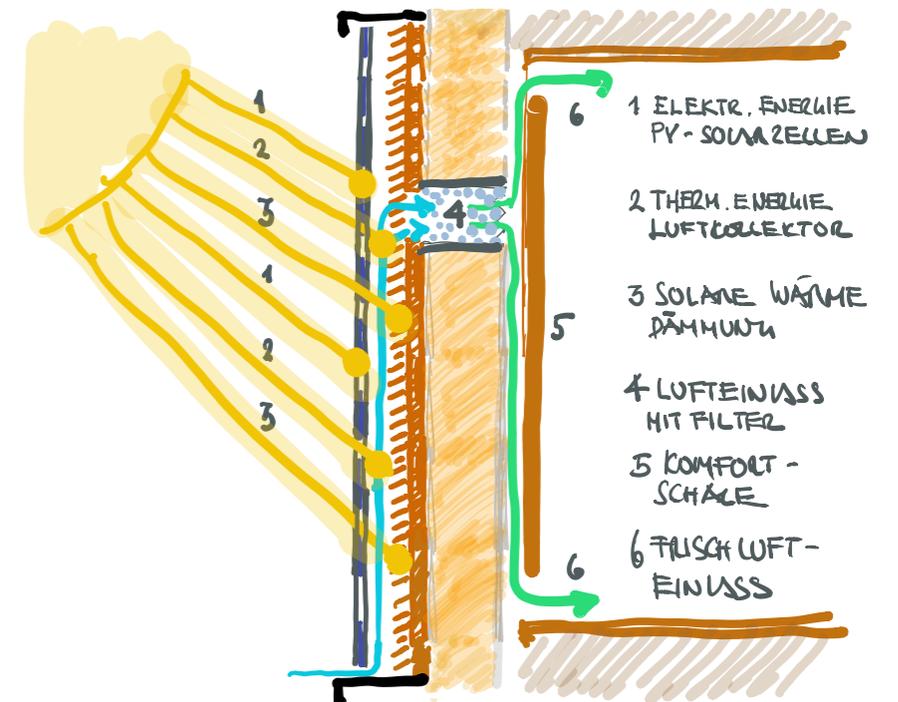
te diffuse nella progettazione architettonica; pertanto, un ulteriore carattere innovativo della soluzione risiede in una visione evoluta del progettista che va oltre la tecnologia passiva e intravede nel calore accumulato una potenziale energia da sfruttare. Al fine di sfruttare questa energia termica la soluzione *Lucido aPlus* simula il funzionamento dei collettori solari attraverso un sistema di immissione ed aspirazione meccanica dell'aria che recupera l'aria pre-riscaldata e la convoglia verso un condotto di raccolta. Un successivo sistema di canalizzazione permette all'aria pre-riscaldata e precedentemente filtrata di raggiungere una pompa di calore aria-acqua, dove il contributo dell'energia termica apportata sotto forma di calore supporta l'impianto di riscaldamento, di produzione di acqua calda sanitaria e di ventilazione meccanica controllata; l'aria pre-riscaldata può, eventualmente, essere anche immessa direttamente negli ambienti attraverso un sistema di ventilazione meccanica controllata locale. Accanto alla strategia solare passiva di ausilio all'isolamento termico e quella attiva per la produzione di energia termica, nella versione *Lucido ePlus* il brevetto europeo prevede anche l'utilizzo di celle fotovoltaiche monocristalline integrate nel vetro, aspetto



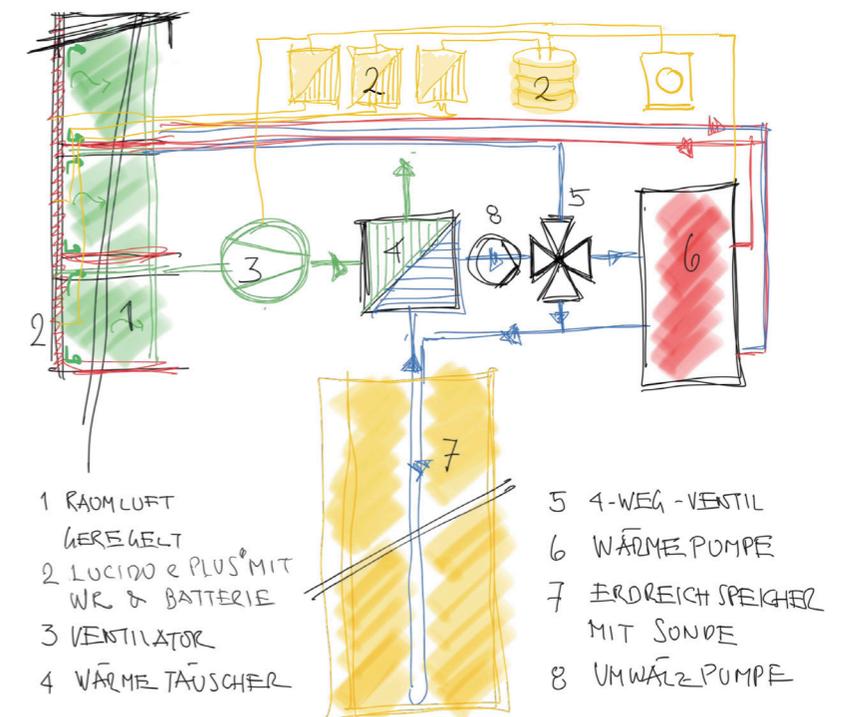
fotografia del componente Lucido Solar nella versione *Lucido ePlus*
(fonte: Lucido Solar AG)

che permette di collocare la soluzione nel panorama BIPV; il miglioramento delle prestazioni termiche, che rappresenta il principio di funzionamento fondamentale della soluzione, viene garantito attraverso un adeguato distanziamento tra le celle fotovoltaiche che permette al tempo stesso il passaggio della radiazione solare e la visibilità del legno fresato retrostante. Quando le condizioni in periodo estivo sono estreme è possibile incanalare aria fresca di mandata nell'intercapedine come sistema di raffrescamento: procedendo per moto convettivo verso l'alto, l'aria di mandata recupera il calore generato in prossimità delle celle PV e da un lato ne migliora l'efficienza e dall'altro riduce l'ingresso di calore negli ambienti interni. Nel caso in cui l'aria immessa per abbassare la temperatura delle celle PV venga anche riutilizzata per l'impianto di condizionamento, la soluzione garantisce simultaneamente le tre funzioni di isolamento termico, produzione di energia termica e produzione di energia elettrica e viene identificata come *Solino*.

Altro elemento di interesse relativo a tutte le declinazioni della soluzione *Lucido* consiste nelle strategie di integrazione che offre, intese come la possibilità di adottare il sistema sia in forma estesa, come rivestimento per ampie superfici di involucro, sia in forma ridotta, essendo una soluzione che lavora con moduli indipendenti e, talvolta, affiancati. Questo implica che il relativo sistema di funzionamento, dalla versione di base *Lucido* a quella più completa *Solino*, opera in maniera autonoma senza incidere sugli altri, condizione che ne facilita sia l'installazione che eventuali fasi di sostituzione per interventi di manutenzione e riqualificazione.



Sketch di funzionamento di *Lucido ePlus*
(fonte: Lucido Solar AG)



Sketch di funzionamento di *Solino* con connessione impiantistica
(fonte: Lucido Solar AG)

Contestualizzando questa tecnologia al panorama architettonico, tutti i progetti che adottano una o più delle declinazioni di *Lucido* sono edifici di nuova costruzione realizzati negli anni recenti, ma l'analisi di alcuni di essi permette comunque di elaborare interessanti riflessioni nell'ottica della riqualificazione del patrimonio edilizio.

/ Centro Tobel

Il Centro Tobel è un complesso residenziale per 150 abitanti realizzato sotto la direzione di Fent Solare Architektur e costruito a Tobel-Tägerschen nel Canton Turgovia, sul sito di un terreno industriale dismesso di 3000 m². Tra gli obiettivi del progetto, una riduzione del costo medio degli alloggi e l'azzeramento delle emissioni di CO₂ dovute al condizionamento dell'edificio e alla produzione di acqua calda (ottenuto con massima efficienza energetica sulla base dello standard Minergie-P, processo di costruzione con ridotte emissioni di CO₂, massima autosufficienza possibile con energia autoprodotta), gli hanno conferito nel 2018 il premio solare svizzero, lo *Schweizer Solarpreis*.

I singoli componenti *Lucido aPlus* sono installati su tutte le facciate e si intervallano con le aperture, seguendo in tal modo una composizione a nastro, oppure sono installati sui volumi inglobati nelle logge. Come versione *aPlus*, ciascun elemento contribuisce a migliorare le prestazioni dell'isolamento termico e si comporta come un collettore solare ad aria; anche nei periodi invernali e nei giorni più nuvolosi, infatti, la temperatura dell'aria raccolta dal componente solare è di circa

8°-12° superiore a quella esterna. Un sistema di prelievo dell'aria pre-riscaldata nell'intercapedine degli elementi *Lucido* la recupera e ed un ventilatore centrale la trasporta meccanicamente negli ambienti (camere da letto e zone giorno), garantendo un ricambio di 30 m³/h nell'ambiente ed una riduzione complessiva dei costi di investimento del 20%. L'aria di scarico viene invece prelevata nelle aree interne degli alloggi e l'energia termica recuperata viene utilizzata a supporto di una pompa di calore aria-acqua (WP) per coprire il fabbisogno energetico di tutta l'acqua calda a 55°. Al di là dei componenti termici *Lucido aPlus* integrati come rivestimento opaco, viene adottato anche un sistema fotovoltaico integrato nei parapetti come elemento di protezione.

(Lucido Solar AG)

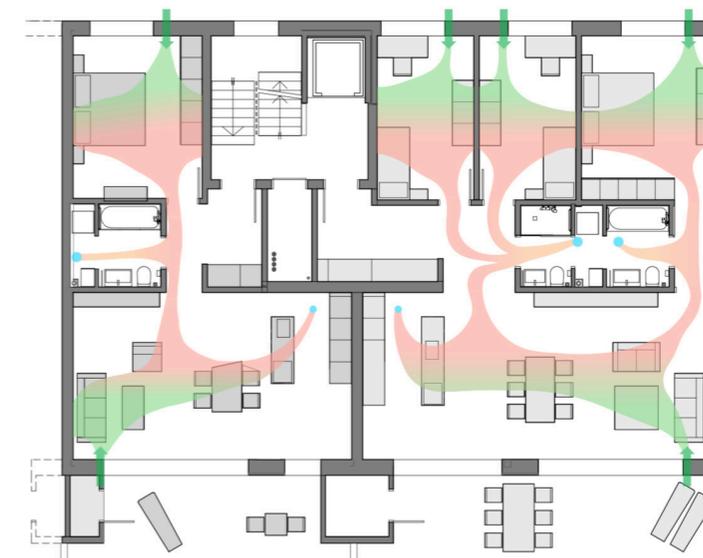
Fent Solare Architektur

Centro Tobel
Nuova costruzione, 2017
Tobel-Tägerschen, CH
47°30'30" N
9°01'50" E



(in alto)
fotografia del complesso Tobel: i componenti *Lucido aPlus* integrati nei volumi pieni delle logge e tra le finestre in una composizione a nastro (fonte: Lucido Solar AG)

(a destra)
schema di funzionamento del sistema di immissione/prelievo dell'aria per appartamento. I componenti *Lucido aPlus* immettono l'aria pre-riscaldata direttamente negli ambienti interni, mentre un sistema di recupero preleva l'aria di scarico che viene utilizzata a supporto di una pompa di calore aria-acqua. (fonte: Lucido Solar AG)



Da questa esperienza emergono delle riflessioni interessanti ai fini di una lettura più trasversale dell'urgenza di introdurre la componente impiantistica nel progetto di architettura.

Nell'ottica di confrontarci con un enorme patrimonio edilizio da riqualificare e constatando che il mercato delle costruzioni è già un mercato di riqualificazione⁷, intervenire con l'adozione di soluzioni impiantistiche di dimensioni fisicamente ridotte e tra loro indipendenti, in tal modo integrabili in aree di intervento limitate e distinte ma garantendo al contempo una molteplicità di funzioni ed ottimi valori prestazionali, potrebbe apparire come una plausibile ed efficace traiettoria di lavoro.

Inoltre, il concetto di un componente integrato che al tempo stesso possa garantire più funzioni, suggerisce l'idea di poter lavorare con volumi ridotti ed inseriti nella composizione architettonica che fungano, inoltre, da *case* per ospitare le parti dell'apparato impiantistico come cavi o condotti che, altrimenti, resterebbero visibili (come suggeriscono i volumi integrati nelle logge con la soluzione *aPlus*⁸ e come suggeriranno altri casi studio analizzati successivamente).

È interessante, ancora, osservare come il progetto manifesti la posizione dichiarata di un architetto che, per suo interesse personale verso la componente energetica degli edifici e per proprie competenze progettuali, riesce a combinare tra loro aspetti relativi alla tecnologia solare, sia essa passiva che attiva, il tutto continuando a garantire una qualità architettonica dal valore aggiunto.

Tale tendenza ad indirizzare in una visione olistica gli aspetti sia compositivi che impiantistici è senza dubbio un atteggiamento lodevole, considerata l'attuale sfida energetica che sta esortando ad una sempre maggiore dotazione impiantistica per gli edifici. Ciò nonostante, l'analisi delle architetture firmate Fent Solare Architektur ha riconosciuto una discrepanza tra quanto dichiarato dal brevetto europeo n.EP3136016B1 (*Lucido Solar AG*) ed i progetti realizzati: in merito alla soluzione *Lucido aPlus*, non è stato individuato alcun caso che documentasse un sistema di canalizzazione per il convoglio dell'aria pre-riscaldata verso una pompa di calore a supporto di un sistema HVAC e per la produzione di acqua calda sanitaria, sebbene il brevetto europeo e gli *sketches* forniti dall'autore ne dimostrassero l'intento; è possibile dichiarare, infatti, che i componenti *Lucido aPlus* integrati nelle architetture costruite, quando disponibile una documentazione testuale o fotografica degli stessi, immettono aria pre-riscaldata direttamente negli ambienti interni, attraverso un sistema di ventilazione meccanica controllata

7. Si consideri che nel 2019 il valore della produzione nel mercato delle costruzioni italiano era costituito solo dal 25,5% di investimenti in nuove costruzioni, con la restante quota che ha rappresentato gli investimenti in manutenzione straordinaria e ordinaria (Bellicini, 2020)

8. In questo caso specifico, i volumi integrati nelle logge che separano i singoli alloggi non sono utilizzati come *case* per ospitare alcune delle parti impiantistiche, ma la loro posizione e la loro forma ne ha suggerito tale riflessione

9. Laureato in architettura ed esperto di economia delle costruzioni e di trasformazioni urbane e territoriali, Lorenzo Bellicini svolge il ruolo di Direttore Tecnico di CRESME RICERCHE, che fornisce al settore privato e alle istituzioni pubbliche informazioni e *know-how* per descrivere e prevedere l'andamento dell'economia e del mercato delle costruzioni a livello nazionale ed internazionale

locale. La stessa immissione di aria all'interno del componente *Lucido aPlus*, dichiarata nel brevetto europeo al fine di garantire un flusso d'aria pre-riscaldata controllato, non viene comprovata in alcun caso studio analizzato. Le riflessioni che scaturiscono da tali tasselli mancanti, o punti non risolti, non vogliono screditare l'operato e gli sforzi di un singolo, bensì vogliono stimolare una costante ricerca e dibattito aperto sul tema dell'integrazione impiantistica nel progetto di architettura. L'immissione e la ripresa meccanica di volumi d'aria passanti per componenti di facciata non è un'impresa semplice, a maggior ragione se si considerano impianti centralizzati che necessitano tubature da diametri non trascurabili. La disposizione di tali impianti implicherà necessariamente variazioni di spessori, di pesi e dell'aspetto degli elementi nei quali sono integrati, ed è per tale motivo che l'intento di Fent Solare Architektur di combinare scelte compositive ad esigenze impiantistiche in un unico prodotto, ed in un unico progetto, rappresenta un atteggiamento degno di considerazione ai fini di tale lavoro di tesi.

Altro punto di interesse è la constatazione che lo stato dell'arte conta un numero limitato di architetture che adottano il sistema integrato *Lucido* (e le sue varianti) e che resta circoscritto ai soli progetti firmati Fent Solare Architektur; il processo di realizzazione dei moduli non ha ancora raggiunto un livello di prefabbricazione industriale tale da abbattere i costi di produzione e la soluzione risulta ancora poco accessibile nel mercato. Questo è indice del fatto che nella dinamica BIPV, e nel più ampio scenario di ricerca e sviluppo di prodotti innovativi per l'integrazione edilizia, la sfera dell'architettura e quella della tecnologia

devono necessariamente appoggiarsi a quella industriale in un equilibrio reciproco che, secondo Lorenzo Bellicini⁹, vede il processo di innovazione includere i concetti di *ideazione*, *finanza* (intesa come l'aspetto economico), *gestione* e *costruzione*. (Bellicini, 2020)

L'aspetto economico ed i processi di produzione acquistano un ruolo fondamentale per il trasferimento di nuove soluzioni nel mercato ma, in coerenza con quanto descritto precedentemente, l'innovazione tecnologica nel settore delle costruzioni ha successo quando tiene conto di tutte le esigenze che la generano e include sfere di competenza differenti. A sostegno di questa tesi è interessante considerare alcune esperienze di riqualificazione edilizia che, seppur non centrali nella storia del BIPV, possono suggerire degli spunti di riflessione che incrociano il tema investigato con traiettorie trasversali.

GAP Solution AG

/ documentazione

La prima delle tre ondate del ciclo edilizio corrisponde agli anni della ricostruzione, quel periodo successivo alla seconda guerra mondiale che dura fino agli anni Settanta, in cui la principale esigenza era rispondere ad una domanda di alloggi prevalentemente quantitativa. La necessità di costruire sistemazioni in tempi brevi ed in totale assenza di requisiti energetici¹⁰ ha condotto, infatti, verso un patrimonio edilizio totalmente inefficiente nelle attuali logiche di transizione energetica.

È in questa logica di riqualificazione del patrimonio edilizio in tempi rapidi e con il minor disturbo possibile per gli utenti che si muove il lavoro di GAP Solution, un'azienda austriaca che gode di un'esperienza ventennale nella produzione di soluzioni di facciata dalle elevate prestazioni termiche.

10. Nel quadro normativo europeo la prima EPBD (Energy Performance Building Directive) è la direttiva 91-2002 CE del 2002

(a destra)
fotografia del complesso Dieselweg riqualificato con l'integrazione dei moduli GAP Skin in facciata
(fonte: GAP Solution)



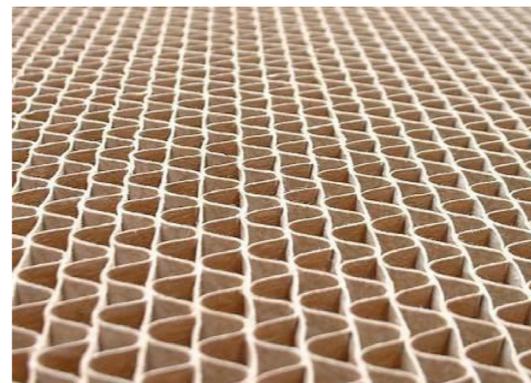
Parallelamente alle soluzioni di Lucido Solar AG ma in contesti e con obiettivi nettamente differenti, anche GAP Solution propone tre soluzioni con funzionamento sia passivo che attivo che sfruttano la radiazione solare a beneficio dell'edificio:

GAP Skin, che utilizza la radiazione solare come contributo all'isolamento termico;

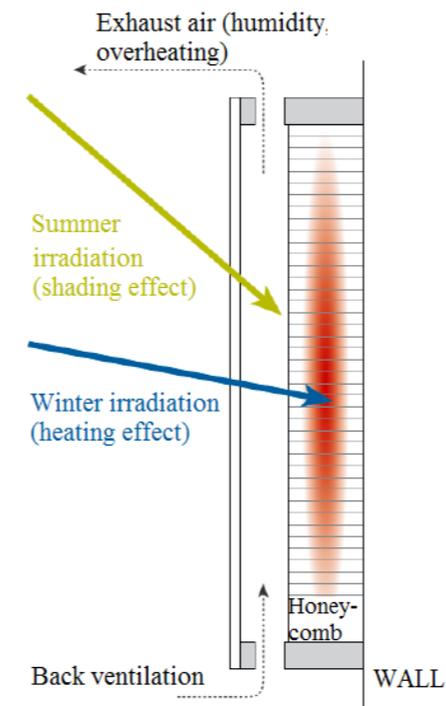
GAP Air, che recupera l'aria pre-riscaldata per immetterla negli ambienti con un sistema di ventilazione meccanica controllata integrato nella facciata e decentralizzato per ridurre le perdite di calore;

GAP Water che lavora come un collettore solare e sfrutta l'acqua pre-riscaldata dalla radiazione solare per alleggerire il sistema centralizzato di fornitura di acqua calda sanitaria (o, in alternativa, la distribuisce in modo decentralizzato direttamente dalla facciata per ridurre le perdite di calore di distribuzione); in questo ultimo caso la soluzione Water può integrare anche moduli fotovoltaici che supportano la produzione di acqua calda sanitaria, rientrando in questo modo nella logica BIPV dove il fotovoltaico assolve anche la funzione di rivestimento esterno.

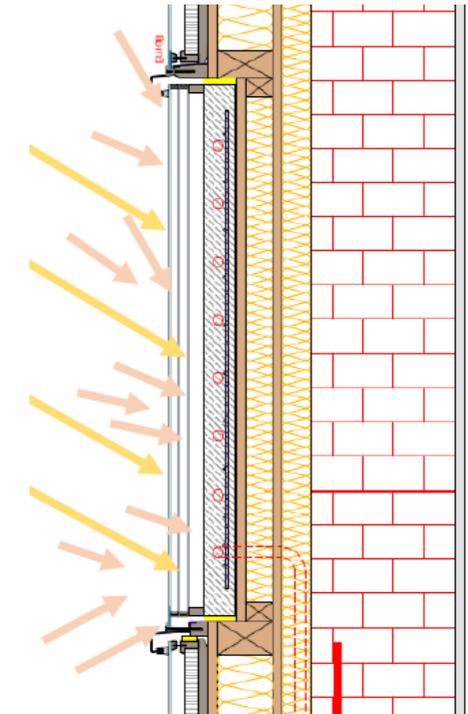
Il concetto di facciata solare della soluzione GAP Skin risiede nel catturare la radiazione solare che, intercettando un vetro esterno, resta intrappolata in un'intercapedine d'aria per essere sfruttata come energia termica. Un pannello di cellulosa dalla struttura a nido d'ape è posto tra l'intercapedine d'aria e lo strato di isolante termico e, in virtù della variazione dell'altezza solare nell'arco di tempo di un anno, sfrutta la sua geometria per accogliere la radiazione solare o schermarla dal pannello isolante in funzione della stagione.



(in alto)
vista di dettaglio della stratigrafia della soluzione GAP Skin: l'intercapedine d'aria è interposto tra il vetro esterno ed il pannello in cellulosa con struttura a nido d'ape (fonte: GAP Solution) (sopra)
dettaglio del pannello in cellulosa con struttura a nido d'ape (fonte: GAP Solution) (sotto)



a / GAP Skin



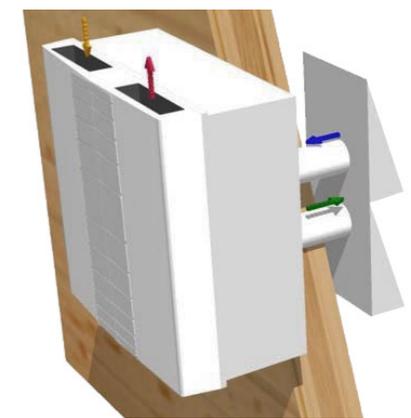
b / GAP Water

Schemi di funzionamento e rappresentazione dei componenti delle soluzioni di Gap Solution

a / sezione schematica de funzionamento di GAP Skin: in virtù della sua geometria, il pannello in cellulosa schermo lo strato isolante durante l'estate; in inverno, invece, quando l'altezza solare è ridotta, la stessa geometria accoglie i raggi solari e lo strato in cellulosa si comporta come una sezione tampono. In entrambi i casi, l'obiettivo è ridurre il trasferimento del calore attraverso la parete.

b / sezione tecnologia di GAP Water: il calore catturato nell'intercapedine d'aria alimenta il riscaldamento dell'acqua del collettore termico integrato nella soluzione. L'acqua pre-riscaldata è di ausilio al sistema di fornitura di acqua calda sanitaria.

c / rappresentazione tridimensionale dell'elemento di ventilazione integrato in GAP Air: l'aria pre-riscaldata viene recuperata e purificata dallo scambiatore d'aria che la immette direttamente negli ambienti interni, contribuendo al risparmio energetico e alla riduzione delle perdite energetiche dovute alla distribuzione della ventilazione.



c / GAP Air

/ Complesso Dieselweg

Dieselweg, nella zona Sud di Graz in Austria, è un quartiere residenziale costruito negli anni Sessanta che appartiene alla prima ondata del ciclo edilizio e non è mai stato riqualificato fino all'intervento di Hohensinn Architektur; questo implica che fino al 2009, anno di completamento dei lavori, gli utenti hanno vissuto in alloggi privi di isolamento termico e con elevati costi di riscaldamento dovuti all'uso di impianti non efficienti. Il progetto di retrofit include la riqualificazione di tutto il complesso residenziale, con i cinque condomini a blocco e quello in linea che adottano le tre soluzioni proposte da GAP Solution. Nonostante il principio di funzionamento di *GAP Skin* sia parallelo a quello che circa un decennio dopo Giuseppe Fent adatterà nella versione base delle soluzioni di Lucido Solar AG, la distanza temporale, i contesti geografici e culturali ed i materiali adottati nelle soluzioni evidenziano scenari distanti, dettati da obiettivi altrettanto differenti. Il progetto di retrofit del Dieselweg appartiene ad una logica di intervento su edifici popolari in cui l'obiettivo è riqualificare in tempi brevi e con costi ridotti, motivo per il quale la scelta ricade su materiali economici come la cellulosa e su processi di produzione *off-site*.

Queste scelte hanno indotto alla riuscita dell'intervento intesa come una sostanziale riduzione della domanda energetica (che si registra intorno al 93%) ed il riconoscimento del titolo di *Passivhaus* ma, guardando con una prospettiva più ampia in cui si includono anche altri interventi di GAP Solution, il progetto di architettura sembra sottostare ai requisiti di ordine tecnico e/o energetico. Pro-

getti come Dieselweg in cui la progettazione energetica non sempre valorizza la qualità architettonica sono frequenti, ma la selezione e l'analisi di questo specifico caso studio vuole mettere in luce potenziali valori aggiunti per la progettazione BIPV; da questo punto di vista, il processo *off-site*, che riduce notevolmente i tempi di lavoro durante le fasi di cantiere, appare come un carattere di innovazione interessante anche per il *Building Integrated Photovoltaics* che, attualmente, si avvale quasi esclusivamente della realizzazione in cantiere di sistemi a parete ventilata. Nel progetto di Dieselweg, infatti, i moduli *GAP Skin* sono precedentemente realizzati ed assemblati con processi di produzione industriale, per essere successivamente trasportati in cantiere come pannelli prefabbricati di estese dimensioni (ciascun modulo misura 12x3m). Attraverso operazioni preliminari di rilievo laser vengono acquisite tutte le informazioni necessarie, incluse la presenza e la posizione precisa delle aperture, per garantire estrema precisione in fase progettazione dei pannelli; queste operazioni permettono di velocizzare e facilitare la fase di montaggio in cantiere che, a tal punto, consiste nella sovrapposizione ordinata di fasce orizzontali.

Hohensinn Architektur
con **GAP Solution**

Complesso Dieselweg
Riqualificazione, 2009
Graz, A
47° 4' 0 N
15° 27' 0 E

Energy Globe Styria Award 2009



(sopra)
fotografia del complesso Dieselweg riqualificato con l'integrazione dei moduli *GAP Skin* in facciata (fonte: GAP Solution)

(sotto)
fotografie del cantiere in fase di installazione della facciata (fonte: GAP Solution)



La rapidità con cui è stata portata a termine la riqualificazione del complesso di Dieselweg, attraverso l'adozione di sistemi prefabbricati leggeri ed integrati di impianti secondo il modello *plug&play*, rientra in una strategia di intervento ampiamente condivisa e considerata efficace per la riqualificazione del patrimonio edilizio; il caso studio, infatti, viene inserito tra gli esempi riportati in *Annex 50. Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings*, un progetto di ricerca portato avanti dal 2006 al 2011 nell'ambito del più ampio programma di ricerca ed investigazione EBC (*Energy in Building and Communities Programme*) della IEA, *International Energy Agency*, composto da 59 progetti di ricerca, denominati annex. Il cinquantesimo, quindi, vuole dimostrare un concetto di ristrutturazione dell'intero edificio basato sull'uso della prefabbricazione leggera per involucri altamente isolanti ed integrati con sistemi HVAC e sistemi solari. (GAP Solution)

Energiesprong

/ documentazione

Altra esperienza analoga alla riqualificazione del quartiere Dieselweg per l'adozione della prefabbricazione leggera con integrata la dotazione impiantistica è quella di **Energiesprong**.

A differenza del caso precedente, dove uno studio di architettura ed un'azienda privata intervengono su un caso specifico, Energiesprong sorge come un team di sviluppo no profit indipendente, incaricato dal governo nazionale olandese per sviluppare soluzioni di efficientamento energetico del settore edilizio residenziale, con una iniziale priorità verso l'*housing* sociale, raggiungendo prestazioni NZE (*net zero energy*).

L'obiettivo perseguito è, ancora una volta, la riqualificazione del settore edilizio e la sua progressiva industrializzazione e prefabbricazione al fine di ridurre tempi e costi ma, a differenza del caso precedente, la collaborazione tra Energiesprong, il governo nazionale, le autorità locali e le imprese di costruzione è finalizzata ad una più estesa e radicale trasformazione del mercato edilizio.

(a destra)
Riqualificazione Energiesprong a Melick, NL
fotografia di Frank Hanswijk (fonte: <https://www.flickr.com/>)

(a seguire)
Riqualificazione Energiesprong a Melick, NL
fotografia di Frank Hanswijk (fonte: <https://www.flickr.com/>)



I pilastri fondanti del progetto sono:

/ la **garanzia a lungo termine** (ca. trent'anni) del rendimento energetico dell'edificio;

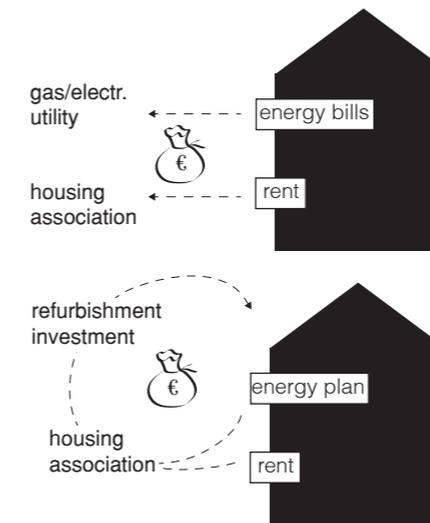
/ la **durata dell'intervento** inferiore a due settimane con la possibilità da parte degli inquilini di permanere negli alloggi;

/ l'**accessibilità economica**, che implica che l'investimento debba essere pagato dai risparmi sui costi energetici risultanti dall'intervento (ovvero il valore netto dei risparmi sui costi energetici durante la vita dell'edificio stabilisce l'obiettivo di prezzo);

/ la **desiderabilità** e l'attrazione, intese come la capacità dell'intervento di migliorare la qualità della vita e l'aspetto degli alloggi e, pertanto, risultare desiderabile agli occhi degli utenti.

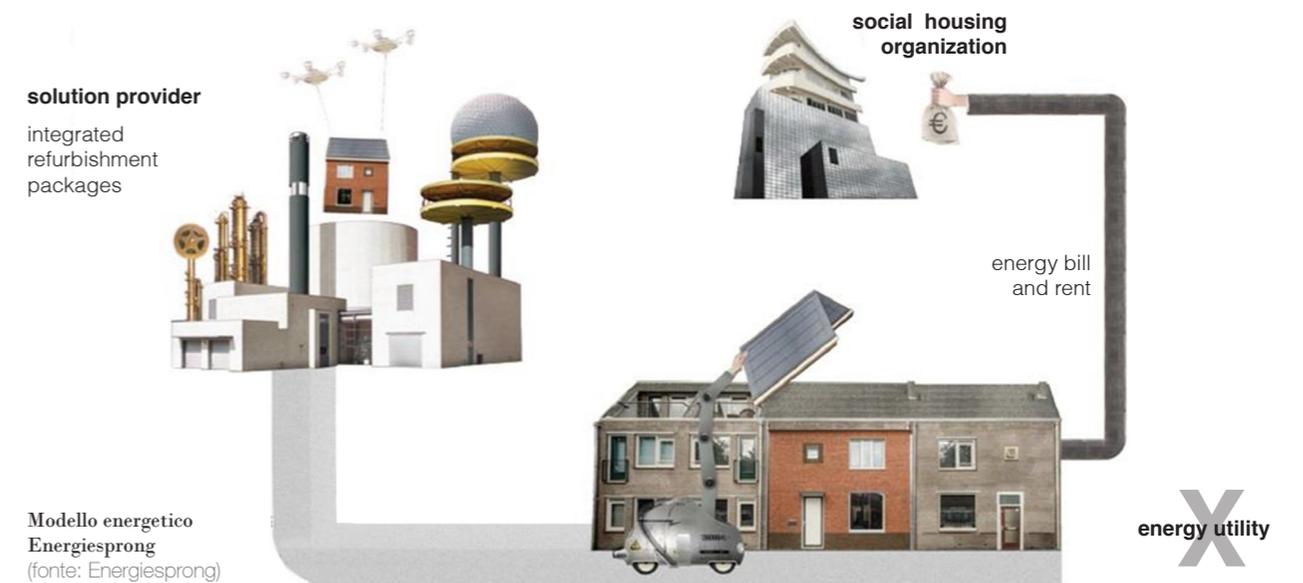
Partendo da tali obiettivi, era chiaro come la principale sfida non fosse esclusivamen-

te legata alla sola produzione di soluzioni tecnologiche innovative, bensì ad una più radicale innovazione del processo edilizio. Il team di Energiesprong intuisce la necessità di presentarsi ed introdursi nel mercato delle costruzioni come un attore indipendente no profit, un soggetto mediatore con lo scopo di coordinare diversi *stakeholders* e facilitare la trasformazione del mercato. Durante un'intervista condotta per il *PPANthebrief* (curato da PPAN Comunicazione e Networking per il Costruito), Ron Van Erck di Energiesprong dichiara come il lavoro del team non sia quello di realizzare i prodotti, bensì creare il mercato per le imprese di costruzione affinché siano queste a sviluppare le soluzioni; il loro compito, quindi, è collaborare per ridurre il rischio delle imprese sugli investimenti e prototipare le soluzioni in fabbrica.



Modello energetico tradizionale e modello energetico Energiesprong
(fonte: elaborazione propria)

Altro fattore trainante della trasformazione è il piano energetico sviluppato da Energiesprong: il modello tradizionale che vede l'inquilino interagire con l'azienda immobiliare per l'affitto e con le compagnie di fornitura energetica per le bollette è sostituito da un modello in cui l'inquilino paga all'azienda immobiliare una *service fee*, un'unica tassa energetica comprensiva di affitto, che l'azienda immobiliare investe per l'intervento di riqualificazione. In altre parole, quindi, i risparmi sui costi dei consumi energetici dovuti all'intervento di riqualificazione si traducono in una tassa mensile utilizzata per permettere lo stesso, con una spesa mensile pari a quella precedente ma con edificio ad energia zero.

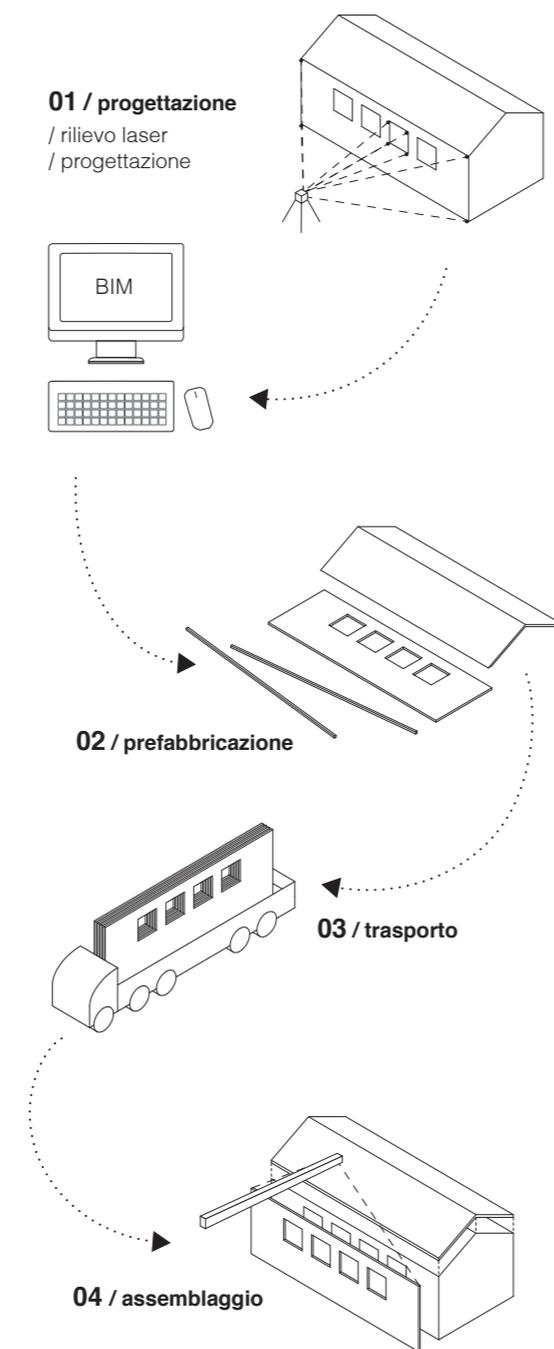


Modello energetico Energiesprong
(fonte: Energiesprong)

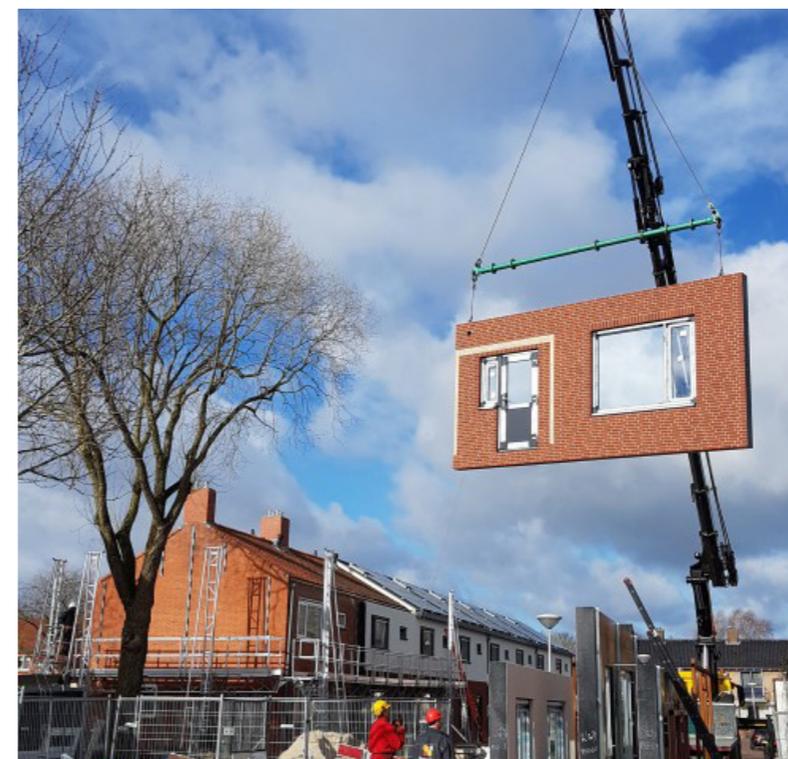
La velocità di operazione garantita dal progetto, l'opportunità per gli inquilini di permanere negli alloggi senza essere disturbati e la pulizia del cantiere sono dovuti al processo di costruzione *off-site*, che prevede l'utilizzo di componenti di involucro modulari e preassemblati in fabbrica, già dotati di strato isolante, infissi, elementi di ancoraggio e componenti impiantistiche per garantire le prestazioni dichiarate, e che rivestono dall'esterno l'involucro esistente. Una preliminare scansione 3D dell'edificio effettuata dall'impresa di costruzione permette di ottenerne un modello tridimensionale di millimetrica precisione, utilizzato successivamente per la progettazione e realizzazione *ad hoc* dei componenti integrati.

Al fine di aumentare gli spazi abitativi ed incrementare il livello di prefabbricazione, il team Energiesprong sollecita le imprese di costruzione ad una maggiore integrazione impiantistica, incoraggiando la progettazione di componenti impiantistici (pompe di calore, serbatoi di acqua calda, sistemi di ventilazione, inverter) sempre più snelli e compatti, per poterli integrare nei nuovi componenti di involucro. Tali componenti modulari, compresi i portali esterni di ingresso a ciascun alloggio, integrano la dotazione impiantistica necessaria al funzionamento dell'edificio e suggeriscono, pertanto, quell'approccio progettuale che rende il prodotto al tempo stesso funzionale e desiderabile.

(Energiesprong)



Processo costruttivo Energiesprong
(fonte: elaborazione propria)



Fotografia dell'intervento durante la fase di assemblaggio
(fonte: energiefondsoverijssel.nl)



Fotografia dell'intervento durante la fase di assemblaggio
(fonte: passivehouseplus.ie)

Progetti europei

/ documentazione

L'opinione condivisa di un'urgente implementazione di interventi di riqualificazione dell'ambiente costruito con la maggiore adozione di FER¹¹ è dimostrata anche da una serie di progetti europei finanziati direttamente dalla Commissione Europea nell'ambito del programma Horizon 2020, per lo sviluppo di componenti di facciata innovativi ed integrati a supporto di un maggiore efficientamento energetico. Ancora una volta, quindi, il tema in esame si allontana dal più circoscritto ambito BIPV, per entrare nel merito di una più ampia riflessione sui rapporti che regolano l'introduzione di componenti impiantistiche nel vasto patrimonio edilizio e gli effetti che questa urgenza di intervento causano sul progetto di architettura.

A scanso di equivoci, va sottolineato che in questo lavoro di ricerca i progetti europei di seguito brevemente riportati verranno considerati esempi non virtuosi, a causa di una totale assenza di sensibilità architettonica in fase di progettazione delle soluzioni.

11. FER, Fonti Energetiche Rinnovabili

BRESAER

Il progetto BRESAER *Breakthrough solutions for adaptable envelopes for building refurbishment*, coordinato da Acciona Costruccion Sa ed interamente finanziato dall'Unione Europea, è stato un progetto pluriennale avviato nel 2015 e completato nel 2019, con l'obiettivo di progettare un sistema di involucro adattabile, economico ed industrializzato che combini soluzioni prefabbricate già disponibili in commercio, sia attive che passive, e che le integri in una struttura leggera.

Lo scopo della struttura in montanti metallici BRESAER è quello di integrare le soluzioni proposte da Ascamm, Stam, SolarWall, e Ulma garantendo l'allineamento sul filo esterno della facciata e l'isolamento a cappotto dell'edificio.

In ordine di elenco:

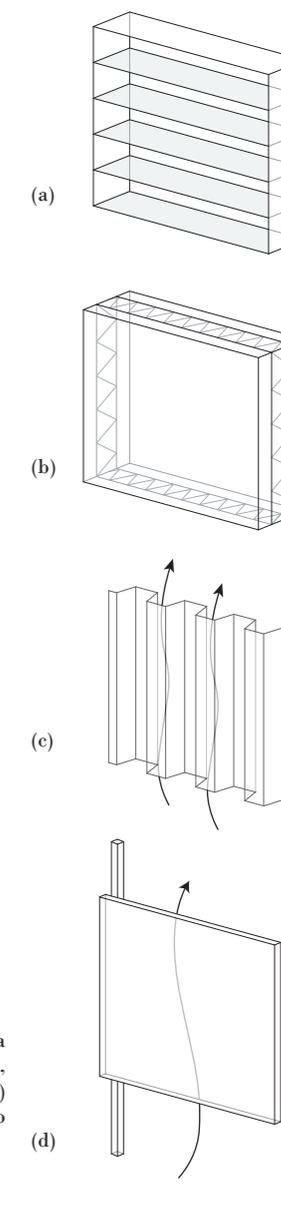
/ finestra dinamica con sistema di schermature solari automatizzato (DW) di Ascamm **(a)**

/ pannello isolante multifunzionale e multistrato realizzato in calcestruzzo rinforzato con fibre ad altissime prestazioni e materiale isolante integrato (IP) di Stam **(b)**

/ componente solare termico ad aria per riscaldamento e ventilazione (SOL) di SolarWall **(c)**

/ pannello di rivestimento leggero in calcestruzzo polimerico per facciata ventilata (VF) di Ulma **(d)**

È prevista, inoltre, la possibilità di integrare la tecnologia fotovoltaica a film sottile semitra-



Rappresentazione schematica delle soluzioni di Ascamm (a), di Stam (b), di SolarWall (c) e di Ulma (d) per il progetto BRESAER (fonte: BRESAER; rielaborazione grafica)

sparente nelle soluzioni IP e VF, garantendo in tal modo la visibilità della finitura del pannello, e la tecnologia fotovoltaica vetro-vetro nella soluzione SOL, con la sostituzione dei moduli superiori con pannelli fotovoltaici rigidi anch'essi semitrasparenti. Uno specifico sistema di controllo BEMS, *building energy management system*, verrà adottato per monitorare lo stato dell'edificio, le prestazioni energetiche e per gestire i sistemi di stoccaggio dell'energia autoprodotta.

Il sistema BRESAER è stato testato selezionando come edificio dimostratore uno dei sei fabbricati in pietra costruiti agli inizi del Novecento come ospedale militare a Burgos, nel nord della Spagna. Attualmente, il fabbricato ad un solo piano fuori terra di 545 m² fa parte del campus universitario di Burgos ed ospita

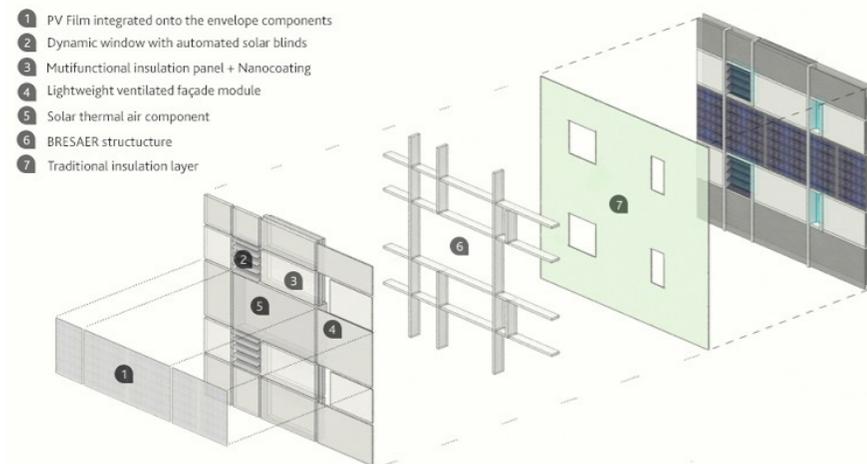
alcune sale conferenza.

Probabilmente sorta come l'unificazione di più borghi medievali, la città di Burgos ha conservato il suo assetto medievale, arricchendosi nei secoli a seguire di nuovi *segni* e linguaggi compositivi fino al palinsesto che oggi rappresenta. La pietra ed il cotto, predominanti nella città, caratterizzano anche le abitazioni, i monumenti e la pavimentazione del quartiere dove sorge l'ex ospedale militare e caratterizzano, inoltre, anche i sei fabbricati dello stesso ex ospedale militare, oggetto di intervento.

Sebbene i report di progetto dimostrino il successo della soluzione, con importanti riduzioni della domanda energetica e delle emissioni di GHG, l'esito finale è un edificio totalmente rivestito con una soluzione tecno-

logica che azzerava la sua valenza storica ed identitaria e lo rende completamente estraneo al contesto di appartenenza. L'unico interesse che emerge dai vari report di progetto verso il fabbricato, infatti, è esclusivamente l'inefficienza energetica che rende l'edificio un'adeguata struttura demo ai fini del monitoraggio della soluzione.

Tale miopia nei confronti della sfera architettonica non ha influito sul risultato del progetto che, invece, è stato oggetto della pubblicazione del Comitato europeo di normazione (CEN) CWA 17437 "*Innovative and adaptable envelopes over existing façades in building refurbishment. Design, economic assessment, logistics and installation guidelines*", per favorire l'accettazione delle soluzioni BRESAER da parte del mercato e come supporto al lavoro di progettisti, produttori ed installatori. (BRESAER)



(a sinistra)
esploso assonometrico del sistema BRESAER (fonte: BRESAER)

(a destra)
fotografia del fabbricato dell'ex ospedale militare di Burgos dopo l'intervento del progetto BRESAER (sopra) (fonte: BRESAER)
fotografia di due dei fabbricati dell'ex ospedale militare di Burgos (sotto) (fonte: BRESAER)



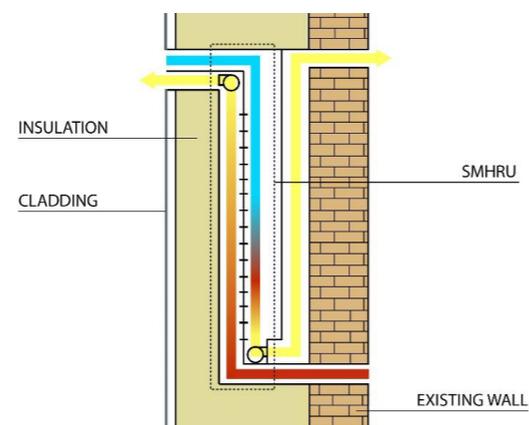
E2VENT

Riflessioni analoghe vengono indirizzate verso un altro progetto equivalente, E2VENT *Energy Efficient Ventilated Façades for Optimal Adaptability and Heat Exchange enabling low energy architectural concepts for the refurbishment of existing buildings*, anch'esso inserito nel programma Horizon 2020 e completamente finanziato dall'Unione Europea, avviato nel 2015 e completato nel 2018, coordinato da Nobatek Inef 4.

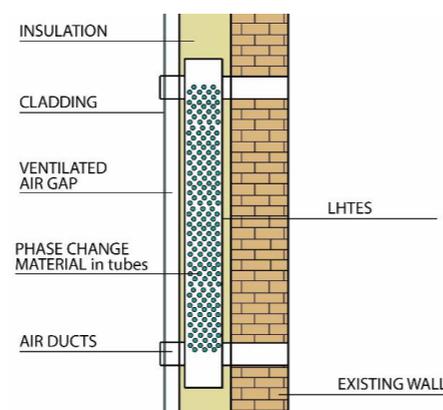
Perseguendo sempre il comune obiettivo di riduzione di domanda energetica ed emissioni di CO₂, il sistema di facciata ventilata sviluppato da E2VENT si compone di due unità impiantistiche inserite nell'intercapedine d'aria:

! *Smart modular Heat Recovery Unit* (SMHRU) per il recupero di calore: uno scambiatore di calore a doppio flusso che permette di recuperare l'energia dell'aria di scarico estratta dagli ambienti interni per cederla all'aria pulita in entrata, garantendo la qualità dell'aria interna e limitando le perdite di energia.

! *Latent Heat Thermal Energy Storage* (LHTES) per l'accumulo di energia termica latente: accumulatore di calore costituito da tubi in alluminio con materiale PCM (*phase changing material*) incorporato. La capacità dei PCM di accumulare e rilasciare energia termica durante il passaggio di fase dallo stato solido a quello liquido e viceversa, sfruttando la capacità termica latente in aggiunta



SMHRU *Smart modular Heat Recovery Unit*
(fonte: E2VENT)



LHTES *Latent Heat Thermal Energy Storage*
(fonte: E2VENT)

a quella sensibile, permettere di ottimizzare le fluttuazioni giornaliere della temperatura e, pertanto, può migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro edilizio.

Al di là della soluzione impiantistica considerata dall'UE una proposta innovativa per affrontare la riqualificazione del patrimonio edilizio, la critica che se ne vuole aprire segue la traiettoria precedente e vuole mettere in guardia dall'eventualità di precipitare nell'ingenua convinzione che le stesse soluzioni di involucro "innovative" possano essere adottate in maniera indistinta rispetto all'oggetto di intervento.

Tale preoccupazione sorge constatando che le soluzioni proposte dal progetto E2VENT vengono anch'esse testate in uno dei sei fabbricati dell'ex ospedale militare di Burgos con un atteggiamento, ancora una volta, limitato nei confronti dell'architettura.

(E2VENT)

(a destra)

Fotografia del fabbricato dell'ex ospedale militare di Burgos prima (sopra) e dopo (sotto) l'intervento del progetto E2VENT
(fonte: E2VENT)



Il rapporto tra la riqualificazione del patrimonio edilizio e l'integrazione di soluzioni impiantistiche innovative per l'efficiamento energetico è un tema delicato, che deve tener conto dell'esistenza di un patrimonio edilizio che, seppur energeticamente inefficiente, talvolta può essere rappresentativo di un'epoca e/o della storia di un luogo e, pertanto, va affrontato con la dovuta sensibilità architettonica.

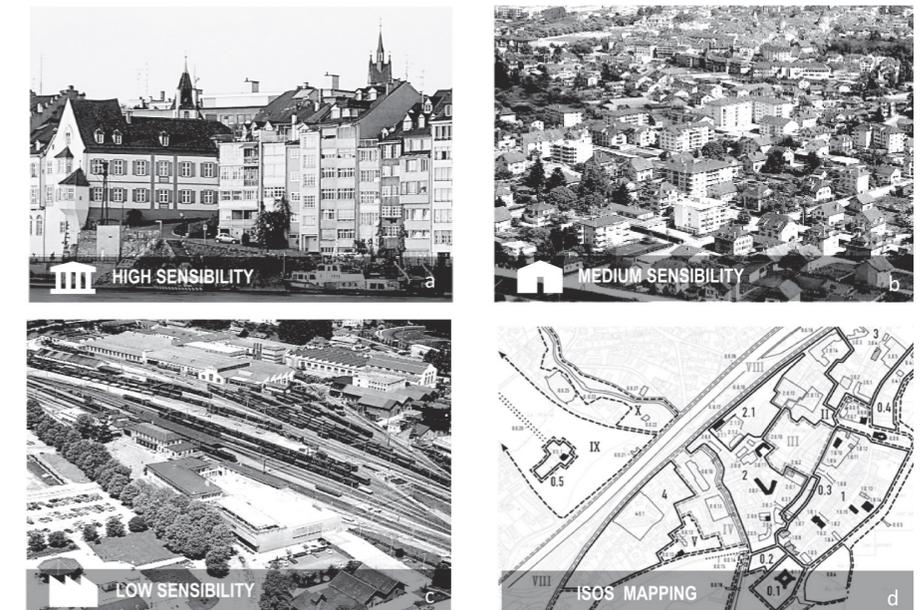
A tale proposito, è interessante citare il lavoro effettuato dal *Laboratoire d'Energie Solaire* LESO presso la EPFL, per l'elaborazione di LESO-QSV (Qualité-Sensibilité-Visibilité), una metodologia che permette di valutare l'integrazione impiantistica, e nel caso specifico l'adozione di impianti solari, ed il relativo impatto visivo sull'ambiente costruito, al fine di promuoverne l'utilizzo anche in aree urbane dall'elevata valenza storica/artistica. (Munari, Roecker, 2019)

Il criterio adottato per la valutazione di ciascun intervento di integrazione solare è costruito su una matrice ordinata 3x3, la *criticity grid*: il concetto ed il grado di "criticità" è definito dalla "sensibilità" del contesto urbano, intesa come il grado di valenza storica di quel luogo, combinata con la "visibilità" dell'intervento dalle aree pubbliche, dovuta alla vicinanza/distanza e alla presenza di ostruzioni; entrambe le variabili sono classificate in "alto", "medio" e "basso" e la loro intersezione riga-colonna definisce nove differenti situazioni di criticità. Una volta definita la situazione di criticità alla quale appartiene l'intervento, la qualità architettonica dello stesso viene definita valutando tre caratteristiche: la geometria, i materiali e la finitura dell'impianto, ciascuna delle quali può apparire pienamen-

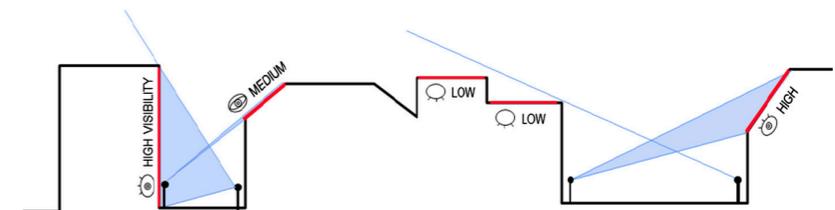
te coerente, parzialmente coerente o non coerente. La valutazione complessiva di tali caratteristiche definisce, infine, il grado qualitativo dell'integrazione.

Matrice di criticità
(fonte: Munari, Roecker, 2019)

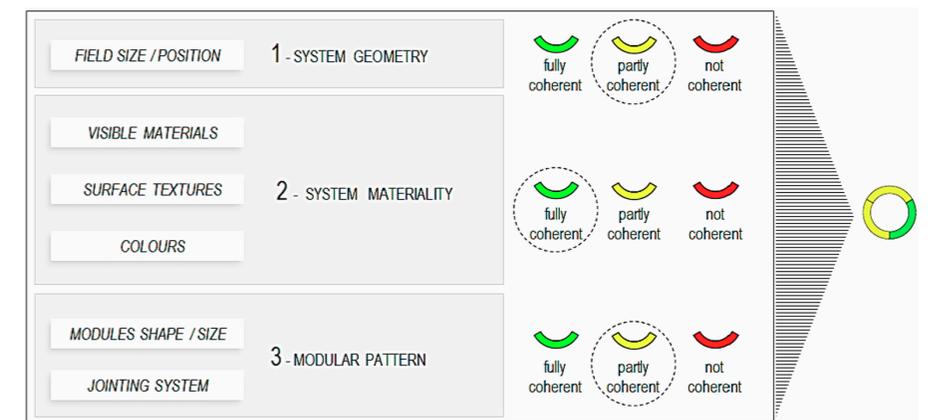
CRITICITY		- context sensitivity +		
		low	medium	high
system visibility	- low			
	medium		moderate	
	+ high			high



Esempi di alta, media e bassa "sensibilità" del contesto urbano (fonte: Munari, Roecker, 2019)



Esempi di alta, media e bassa "visibilità" in contesti ravvicinati (fonte: Munari, Roecker, 2019)



Metodo di valutazione della qualità dell'integrazione: raggruppamento (fonte: Munari, Roecker, 2019)

Riflessioni

Incrociando nuovamente il tema del fotovoltaico integrato, è chiaro che i progetti selezionati in questa sede non rientrano tra le architetture BIPV più iconiche e, talvolta, non integrano necessariamente il fotovoltaico, ma la scelta di trattarli risiede proprio nella possibilità che offrono, rispetto alle architetture BIPV più note, di suggerire spunti di riflessione utili per l'attività di ricerca.

In prima battuta si sottolinea la necessità di affrontare un patrimonio edilizio che sul piano energetico risulta fortemente arretrato e che, pertanto, deve prevedere una solida progettazione impiantistica combinata alla riqualificazione dell'involucro edilizio. Tale combinazione implica, però, una visione progettuale olistica in cui il progetto di architettura sappia farsi carico delle necessarie componenti impiantistiche e che la progettazione impiantistica sappia inserirsi nel progetto sotto il profilo sia funzionale che formale. Lo hanno dimostrato sia il Centro Tobel di Fent Solare Architektur a Tobel-Tägerschen, sia i progetti olandesi di retrofit guidati da Energiesprong che inglobano le componenti impiantistiche in volumi progettati ed inseriti nella composizione del progetto. Sebbene tali progetti non abbiano previsto l'integrazione BIPV in facciata¹², gli approcci adottati suggeriscono la possibilità di inserire il fotovoltaico, quando favorevole rispetto alle condizioni di progetto, come ulteriore componente impiantistico

integrato nelle soluzioni modulari per l'involucro verticale. Questa capacità di integrazione risulta, invece, completamente assente nei progetti europei selezionati, seppur rappresentino uno strumento validato e finanziato dall'UE per la trasformazione del patrimonio edilizio.

Sotto il profilo tecnologico emerge un ulteriore concetto: l'innovazione tecnologica, che nasce dalla disponibilità di conoscenza e ricerca (la trasformazione del fotovoltaico in un nuovo materiale da costruzione BIPV) e da un bisogno concreto di soddisfare un'esigenza (la necessità di intervenire sul patrimonio edilizio) può anche spingersi *sul retro* un pannello fotovoltaico; vale a dire che ad oggi il primo fattore di innovazione del BIPV è la caratteristica visiva del modulo fotovoltaico, aspetto che dovrebbe rendere appetibile il fotovoltaico anche nella progettazione architettonica, ma le esperienze riportate insegnano quanto possa essere vantaggiosa una integrazione impiantistica totale in cui i differenti componenti interagiscono per implementarne l'efficienza. Ne sono un esempio i prodotti ibridi PVT esplorati, la cui possibilità di sfrut-

12. In ulteriori progetti firmati Fent Solare Architektur non specificati in questa sede si prevede l'utilizzo di soluzioni BIPV in facciata, in particolare l'adozione della soluzione Solino che combina produzione di energia termica, produzione di energia elettrica e ausilio all'isolamento termico

tare la radiazione solare per produrre *anche* energia termica (soluzioni ibride PVT) risulta una pratica ancora poco investigata, seppur rappresenti un carattere di innovazione altrettanto interessante per gli obiettivi del BIPV.

Nonostante questi progetti abbiano intravisto una potenziale diramazione nel percorso evolutivo del fotovoltaico integrato, le soluzioni adottate, innovative nei rispettivi contesti, non hanno registrato gli stessi esiti in termini di trasferimento nel mercato. Alcune si sono inserite nel progetto di architettura, ma limitatamente a contesti specifici e poco diffuse nel mercato, altre, invece, stanno instaurando nuovi modelli organizzativi del settore edilizio. Alla base di queste divergenze intese come un basso o alto livello di accettazione dell'innovazione da parte del settore, da un lato c'è la considerazione che l'innovazione tecnologica vada inseguita da un mercato pronto ad accettarla, dall'altro una tesi che inquadra il *Building Integrated Photovoltaics*, esteso alla più ampia traiettoria di innovazione tecnologica dell'ambiente costruito, come un sistema complesso in cui l'innovazione del fotovoltaico non riguarda esclusivamente un *prodotto*, ma sia oggetto di un *processo* che genera le condizioni necessarie per realizzarla e trasferirla nel progetto di architettura.

Il paragrafo si chiude in questo modo con un'anticipazione che funge da nesso per un

ulteriore carattere di innovazione del BIPV, l'ultima chiave di lettura del *fil rouge* che è stato proposto in questo capitolo: la condizione di sinergia necessaria tra il sistema impresa e la ricerca tecnologica per promuovere l'innovazione del BIPV e la posizione chiave che assume il progetto di architettura in questa rete di relazioni.

(a seguire)
Planting inside the box
(Elaborazione propria)

**thinking
outside
planting
inside
the box**



4.5 APPROCCI INTERDISCIPLINARI

Prodotti e processi

Prendendo nuovamente in prestito le espressioni di *research push* e *demand pull* che Nicola Sinopoli richiama nel suo testo *Sulle tracce dell'innovazione*, è stato già delineato il quadro delle esigenze che la transizione energetica impone per il patrimonio edilizio (*demand pull*), ma la *research push*, intesa come la disponibilità di conoscenza della ricerca scientifica, costituisce un'ulteriore condizione necessaria per l'innovazione tecnologica (Tonelli, 2003) L'applicazione incondizionata di pannelli fotovoltaici standard sui tetti delle città europee fornirebbe la risposta ad un'esigenza, qualora questa fosse solo una radicale riduzione delle risorse fossili senza la sua risonanza sull'ambiente costruito¹, ma tale decisione non sarebbe coerente con lo scenario di innovazione tecnologica che sta parzialmente investendo anche il settore delle costruzioni: la quarta rivoluzione industriale.

Il settore delle costruzioni si trova ad operare in un ambiente più complesso e, contrariamente ad esso, estremamente dinamico che è quello delle innovazioni tecnologiche, in cui l'Intelligenza Artificiale (IA), la realtà virtuale (VR), la robotica, la fabbricazione digitale con stampa 3D, sono solo alcuni dei driver del cambiamento in atto da qui al 2050. (Figliola, 2019) (Bellicini, 2020) È in questo contesto di evoluzione che la ricerca sul fotovoltaico integrato, un'innovazione iniziata ormai quarant'anni fa, oggi pone l'accento e produce soluzioni vantaggiose sia per una *demand pull* proiettata all'efficienza energetica degli edifici nel piano strategico del Green Deal Europeo sia ad una *demand pull* non ancora pienamente compresa, ovvero la progressiva necessità di includere nel progetto di architettura la componente impiantistica che, conseguentemente, diventa oggetto di interesse anche per l'architetto.

I progetti che sono stati selezionati nella trattazione precedente segnano le tappe di un percorso più esteso che vede come filo con-

1. La grande bolla speculativa dovuta ai piani di incentivazione, come in Italia il Conto Energia (2005-2013) ha già dimostrato l'inefficienza dell'utilizzo incontrollato ed incondizionato di impianti fotovoltaici

duttore l'innovazione del fotovoltaico ed il suo rapporto con il progetto di architettura. In tal senso i filoni emersi dalla letteratura BIPV, quali il cambio di paradigma della massima efficienza energetica che “scende a compromesso” con la composizione architettonica, le strategie individuate per l'integrazione nel progetto di architettura e le altre forme di energia che la tecnologia fotovoltaica stessa racchiude, vogliono individuare quei vertici dell'innovazione che, quali in maniera più diffusa, quali più sperimentali, stanno delineando la trasformazione di un prodotto.

A questo punto della trattazione il BIPV verrà inquadrato come un prodotto che assume, rispetto alla tradizione, caratteri di innovazione in grado di collocarlo in un nuovo contesto. Analogamente a tutte le innovazioni tecnologiche, però, la sua riuscita è da ascrivere fortemente al grado di accettazione, ovvero alle modalità con cui viene percepito e trasferito in un mercato reale. **È in questo passaggio tra ricerca e pratica, tra soluzioni sperimentali e diffusione di massa, che si interroga il paragrafo corrente, con l'obiettivo di indagare quei modelli di innovazione che stanno innescando dei cambiamenti concreti nel settore delle costruzioni.**

Anticipando, è possibile riconoscere nei suddetti modelli un'altra tappa del percorso evolutivo del BIPV, che per certi versi può assumere il carattere di condizione necessaria per la sua riuscita: il *processo*, un aspetto del *Building Integrated Photovoltaics* che varca i confini del concetto di *prodotto*, l'oggetto fisico che apporta significativi miglioramenti delle prestazioni e diventa un nuovo materiale da costruzione, per considerare l'approccio innovativo, il sistema di relazioni e gli aspetti organizzativi che concorrono alla realizzazione quel prodotto. In questa logica, l'innovazione del BIPV che è generalmente manifestata sul piano del prodotto richiede anche delle trasformazioni del processo nel quale questo prodotto si inserisce: *“l'innovazione di processo comprende al proprio interno l'innovazione di prodotto e ne è influenzata, ma non la esaurisce”*. (Costantini, Norsa, 1985)

Condizioni al contorno

L'assunto iniziale di questa discussione è la scarsa produttività del settore edilizio a fronte di una generale tendenza all'innovazione che al contrario caratterizza gli altri settori. Gli studi sulla produttività del settore edilizio che negli anni si sono diffusi sia a livello europeo che a scala globale registrano in maniera condivisa una produttività del settore delle costruzioni bassa e, soprattutto, peggiorata nel tempo. (Bellicini, 2019) (Teicholz, 2013) (Teicholz, 2004) **figura 1**

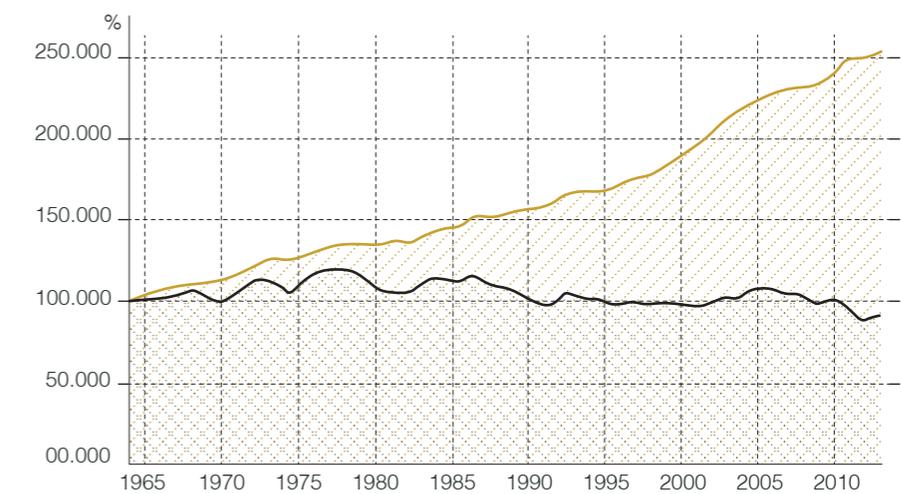
Questo vale a dire che l'industria delle costruzioni è un campo in cui si investe poco in ricerca e sviluppo, ovvero è un settore lento nell'innovare e, in aggiunta, le innovazioni tecnologiche che si sono diffuse sono generalmente di tipo additivo, ovvero già esistenti in altri settori e successivamente trasferite in un altro, che in questo caso è il settore delle costruzioni (Sinopoli, Tatano, 2002)

In altre parole si può affermare che, ad oggi, la disponibilità di conoscenza della ricerca scientifica ha raggiunto livelli di innovazione tecnologica importanti tali da introdurci in una quarta rivoluzione industriale ma, per logiche interne al mercato edilizio, il settore delle costruzioni non è ancora capace di assimilarla e resta un campo

index di produttività del settore edilizio

index di produttività di tutte le industrie non agricole

figura 1
Indici di produttività del lavoro del settore edilizio e di tutte le altre industrie non agricole calcolati sulla base di vari deflatori (1964-2012)
 Produttività calcolata come rapporto tra dollari costanti ed ore di lavoro.
 Il tasso di declino del settore edilizio è pressoché costante, con un calo del -0,32% all'anno, mentre il trend per tutte le altre aziende non agricole è positivo del 3,06% all'anno
 (fonte: Teicholz, 2013; rielaborazione grafica)



arretrato; la bassa produttività del settore edilizio, la difficoltà di prevedere le evoluzioni del mercato, la frammentazione della filiera del mercato, la frammentazione della leadership, la fragilità finanziaria, il cattivo utilizzo dei dati, la competitività della filiera al posto della collaborazione, lo scarso livello di investimenti in ricerca e sviluppo e la cattiva immagine del settore delle costruzioni che di conseguenza se ne ricava sono alcune delle criticità investigate dal Cresme per comprendere la difficoltà del settore edilizio di seguire l'innovazione. (Bellicini 2019) (Bellicini, 2020)

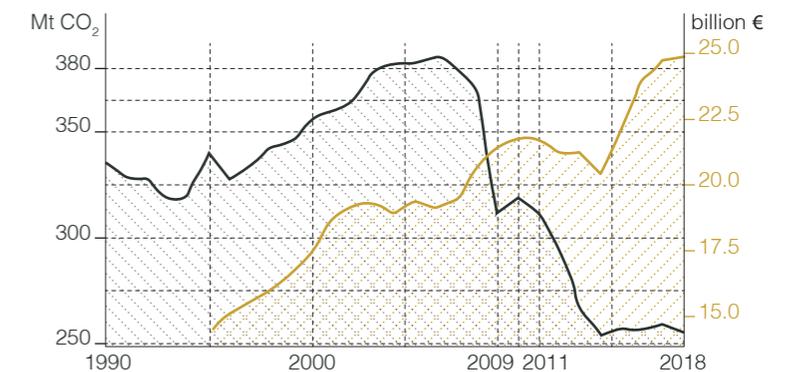
A questa generale difficoltà del settore delle costruzioni, bisogna poi sommare quelle barriere specifiche che limitano la diffusione della tecnologia BIPV, oggetto di analisi di diverse ricerche che negli anni hanno individuato tra i principali ostacoli il costo, l'estetica e la mancanza di conoscenza. (Task 41)

Una lettura ribaltata dei ragionamenti espressi in precedenza permette infatti di intuire alcuni caratteri necessari per un mercato più solido ed evoluto, quali ad esempio rapporti di tipo collaborativo, l'utilizzo di applicazioni interoperabili per la corretta distribuzione dei dati², maggiori investimenti in ricerca e sviluppo. Su quest'ultimo aspetto è interessante sottolineare come il contributo in termini di innovazione tecnologica degli investimenti possa avere anche importanti ricadute in termini occupazionali e di valore aggiunto, ovvero che la produzione di valore aggiunto e di occupazione corrispondenti ad ogni processo produttivo sono più rilevanti quando il contenuto tecnologico è più elevato. (EStà, 2020)

Adottando uno degli esempi presenti nell'analisi della realtà produttiva italiana condotta dal centro di ricerca *EStà – Economia e Sostenibilità*, i pannelli fotovoltaici standard non avranno lo stesso impatto sulla ricchezza ed il tipo di occupazione che invece il brevetto e la produzione di pannelli fotovoltaici di nuova generazione, come i sistemi fotovoltaici integrati, possono fornire. In aggiunta all'aumento occupazionale e di valore aggiunto che l'innovazione tecnologica può apportare, questo studio fornisce un'altra riflessione di grande interesse per il lavoro di tesi: la correlazione positiva tra la diminuzione della CO₂ eq. e l'aumento degli investimenti in ricerca e sviluppo **figura 2**; in altre parole, nei settori in cui l'intensità degli investimenti in ricerca e sviluppo è bassa, come il settore delle costruzioni per le motivazioni sopra elencate, le emissioni della CO₂ registrano i valori

2. I concetti di interoperabilità e condivisione dei dati nel processo edilizio fanno riferimento al Building Information Modeling (BIM)

figura 2
Emissioni di CO₂ e Investimenti fissi lordi in R&S sul totale delle attività economiche italiane (1990-2018)
(fonte: EStà, 2020; rielaborazione grafica)



più alti.

Una ricerca condotta in Francia e pubblicata nel 1992 aveva osservato una quasi totale assenza di interesse da parte dei professionisti nei confronti di risultati pubblicati da centri di ricerca (circa il 10% per quanto riguarda la conoscenza e solo il 2% per quanto riguarda l'applicazione). (Bardin S. et al., 1992) A distanza di anni, questo *gap* tra lo sviluppo tecnologico e la diffusione nel mercato continua ad essere troppo ampio e chiaramente investe anche il campo del BIPV; un'indagine internazionale sulle principali barriere all'integrazione delle tecnologie solari nei progetti di architettura, condotta nel 2012 dall'International Energy Agency (IEA) nel programma *Solar Heating & Cooling Programme* (SHC) Task 41, ha dimostrato come su 439 risposte raccolte, la mancanza di interesse del cliente, la mancanza di informazione del cliente e la mancanza di informazione dell'architetto sono tra i principali ostacoli all'integrazione del fotovoltaico ed hanno raggiunto rispettivamente il 50%, 54% ed il 40%, seconde solo alla barriera economica. (Task 41)

Questi numeri sono il risultato coerente di una condizione ancora attuale in cui, per le criticità del settore edilizio indicate in precedenza, il trasferimento delle innovazioni tecnologiche non potrà seguire il percorso "tradizionale" degli altri settori industriali, che inizia dalla ricerca applicata, passa per il brevetto, la pre-produzione per arrivare infine alla produzione.

Questa sintetica panoramica permette di delineare una condizione generale del BIPV che tenta di inserirsi in un settore edilizio tendenzialmente statico ed incapace di assorbire le innovazioni tecnologiche, ma che a sua volta si trova ad affrontare l'avvio della sfida di transizione energetica promossa dal Green Deal Europeo, improntata a generare un nuovo mercato legato alla lotta contro il cambiamento climatico.

Modelli di innovazione

Partendo dalla riflessione, quindi, che la trasformazione del settore edilizio non potrà seguire un percorso lineare, è lecito interrogarsi su quali potranno essere i modelli di innovazione in grado di generare le condizioni necessarie per l'ingresso delle innovazioni tecnologiche nel mercato.

Tra le possibili risposte, una lettura trasversale dello stato dell'arte del BIPV ed i dialoghi tenuti con personaggi appartenenti al panorama europeo del fotovoltaico integrato³ forniscono il tassello mancante di questo quadro, quell'aspetto che in premessa è stato introdotto come un altro carattere di innovazione del *Building Integrated Photovoltaics* e che può essere facilmente riconducibile al modello svizzero: l'innovazione del processo, un processo che, quindi, non seguirà un percorso lineare. Come anticipato, l'innovazione del processo insiste sugli oggetti immateriali, quelle modalità di svolgimento di determinate operazioni che nel 1997 Nicola Sinopoli definiva come *tecnologia invisibile*. Per Sinopoli la tecnologia invisibile è la "regia" che guida il processo di produzione, sono i saperi, l'organizzazione e l'intelligenza che concorrono alla realizzazione di un progetto di architettura; è "*quanto di immateriale vi è in un processo produttivo*", come lo può essere il progetto di architettura. (Sinopoli, 2004)

Quindi, qual è la tecnologia invisibile da cui dipende la riuscita del BIPV?

In un contesto prevalentemente svizzero, ma parzialmente riconoscibile anche in Austria e Germania, si può identificare un processo organizzativo dal carattere sinergico in cui la ricerca, il sistema impresa ed i professionisti operano secondo un criterio di collaborazione e generano le condizioni per un mercato che, lentamente, sta "seguendo l'innovazione" e sta assimilando la pratica del *Building Integrated Photovoltaics*.

3. Per approfondire si consulti la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

Nello specifico alcuni punti:

! da un lato, la ricerca applicata svolta nelle università non si ferma al progetto di ricerca ed al prototipo, ma si impone degli obiettivi di mercato concreti creando collaborazioni con le imprese di produzione; in questo contesto svizzero e, più ampiamente in quello europeo, la ricerca applicata dell' École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), del centro di competenza PV della Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI) e dell'Istituto di sostenibilità applicata all'ambiente costruito (ISAAC) della SUPSI hanno una notevole incidenza sull'intero panorama del fotovoltaico integrato;

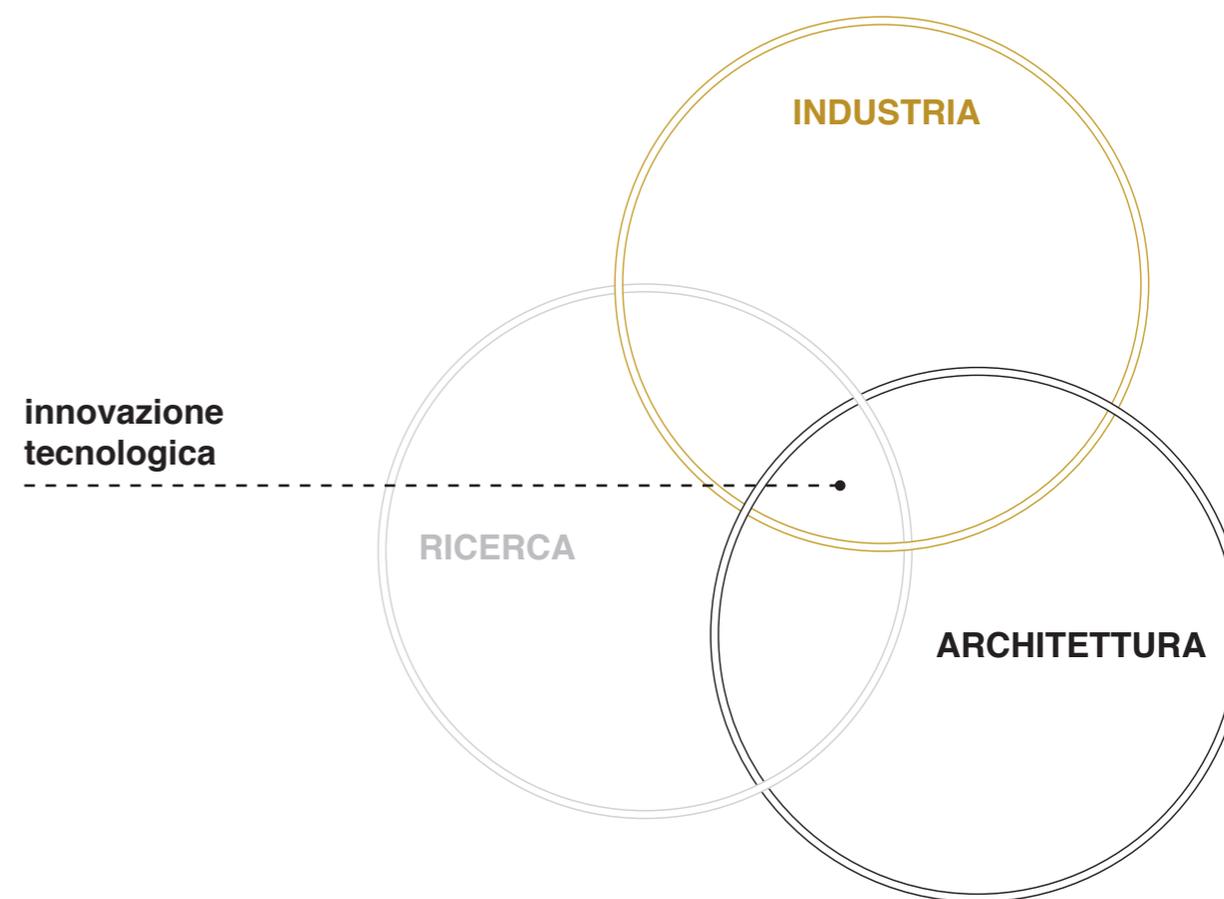
! dall'altro, le imprese che collaborano con i centri di ricerca e ne intravedono le potenzialità, ampliando la gamma di prodotti con soluzioni a "svantaggio" della *massima efficienza energetica* ed in favore di una maggiore integrazione architettonica; tra questi, alcune delle imprese produttrici che hanno collaborato ai progetti di architettura analizzati in fase di ricerca, come SwissInso, ErtexSolar, Solaxess, OnyxSolar;

! dall'altro ancora, i prodotti BIPV oggi disponibili sono merito di una filiera industriale collaborativa, in cui nel corso degli anni l'industria del vetro si è gradualmente inserita in quella fotovoltaica per produrre nuove soluzioni di facciata, che oggi vengono costantemente aggiornate con le tecnologie innovative sviluppate dai centri di ricerca; dalle prime esperienze sperimentali di Thomas Herzog agli attuali progetti di integrazione PV, la tecnologia fotovoltaica integrata è sempre stata accompagnata dalla componente vetrata⁴. *"Credo che, oggi, costruire con il fotovoltaico significhi costruire con il vetro. Solo chi conosce le potenzialità dell'industria del vetro è in grado di realizzare una buona architettura BIPV"*⁵; (Solaris03)

! in questa rete di collaborazioni tra ricercatori e produttori, il progetto di architettura, spesso oggetto di progetti pilota parzialmente finanziati, è quel campo di prova in cui le soluzioni proposte prendono forma e si confrontano con uno scenario reale in cui il contesto, il patrimonio culturale, la composizione dell'architettura sono aspetti che mettono alla prova prodotti teoricamente validi.

In questo particolare momento storico, in cui i modelli tradizionali

della progettazione architettonica si vedono sprofondare sotto il peso delle prescrizioni energetiche e di concetti come "autonomia energetica", è compito degli architetti abbattere le ostilità nei confronti del fotovoltaico ed abbracciare l'idea che le soluzioni integrate possano determinare scenari di grande interesse *anche* per il progetto di architettura. Tutto questo presuppone una visione di tipo olistica, in cui gli strumenti di analisi devono permettere una lettura interdisciplinare capace di mettere in discussione un tradizionale schema di segmentazione dei settori.



4. Per approfondire l'evoluzione temporale del BIPV, si consulti il capitolo 2.4 *Evoluzione del BIPV*

5. Francesco Frontini, ricercatore e docente presso la SUPSI, in un'intervista nell'articolo "Solaris#03" pubblicato da Hochparterre AG

Progetti dimostratori

Alla luce di questo modello collaborativo tra ricerca, industria e professionisti che vede la necessaria integrazione tra sfere di competenza differenti, i progetti di architettura BIPV selezionati in questa ricerca possono essere classificati in due categorie: le *buone pratiche* ed i *progetti dimostratori*.

Per semplificazione, si intendano come *buone pratiche* quei progetti già incrociati nel testo in cui il sistema di *Building Integrated Photovoltaics* viene calato in contesti più abituali, come può esserlo la progettazione e la realizzazione di un'architettura residenziale. In questa dinamica è stata già evidenziata la sensibilità del progettista nei confronti di un nuovo prodotto da costruzione, un materiale (o in senso più esteso, un sistema) che però necessita di essere inquadrato come il frutto di una filiera collaborativa tra industria del vetro ed industria del fotovoltaico.

In questo paragrafo verranno quindi analizzati i progetti dimostratori, quei casi in cui la ricerca applicata collabora con il sistema impresa per dimostrare e "concretizzare" l'innovazione tecnologica, ovvero per introdurre quegli aspetti spesso mancanti nei progetti di ricerca universitari che nel processo di innovazione Lorenzo Bellicini classifica come: *finanza, gestione e costruzione*. (Bellicini, 2020) È in questa logica, quindi, che va inteso il modello interdisciplinare svizzero dove l'approccio sinergico adottato genera le condizioni per produrre fisicamente "qualcosa", qualcosa che con la competenza degli architetti diventa un progetto di architettura dal valore aggiunto.

NEST

Quando Colin H. Davidson scrive che "*ricerca e pratica esistono in due mondi separati, ognuno con le proprie culture, priorità e tempistiche. Qualcosa deve essere fatto per gettare un ponte tra loro, dal momento che l'innovazione giace proprio nel mezzo*" (Sinopoli, Tatano, 2002) quel "ponte" può essere riconosciuto nel progetto NEST *Next Evolution in Sustainable Building Technologies*, un centro di innovazione degli istituti di ricerca Empa e Eawag inaugurato nel 2016 a Zurigo che vuole essere a tutti gli effetti un motore di accelerazione per il processo di innovazione.

L'interesse per il progetto NEST deriva proprio dal suo concept iniziale inteso sia come la realizzazione di un luogo fisico dove ricerca e pratica possano incontrarsi concretamente, in cui i partners provenienti della ricerca, dall'industria e dal settore pubblico hanno modo di confrontarsi, sia come un *living lab*, un laboratorio abitabile in cui gli utenti vivono e lavorano negli stessi ambienti disposti per monitorare nuove tecnologie, materiali e sistemi; a differenza di un laboratorio tradizionale, questa scelta permette di sottoporre le soluzioni sviluppate ad una condizione quanto più vicina alla realtà, in cui i *feedback* degli utenti sono parte della sperimentazione. (Richner et al., 2018)

In un mercato ancora fortemente statico che ostacola il trasferimento delle nuove idee e delle innovazioni tecnologiche provenienti dall'ambito di ricerca, lo scopo principale di NEST è proprio quello di creare condizioni più favorevoli per questo passaggio, collocandosi in una posizione intermedia tra la ricerca e la pratica sottoforma di laboratorio-edificio.

NEST è un edificio modulare a tre piani fuori terra costituito da uno scheletro centrale, la parte statica della costruzione, che ospita un atrio e supporta tre piattaforme libere all'esterno, spazi aperti in cui vengono integrate le unità di ricerca, i moduli che rappresentano le componenti dinamiche del progetto. Agli architetti Fabio Gramazio e Matthias Kohler piace definirlo un *upside down lab*, perché con questa disposizione i laboratori sono periferici e vengono esposti alle condizioni esterne quando tradizionalmente sono collocati all'interno di un edificio, mentre le facciate, il carattere identitario di un edificio, in questo caso sono interne; (EMPA) le piattaforme possono ospitare

una unità esterna al primo ed al secondo piano, mentre la terza piattaforma può ospitare fino a tre unità differenti.

L'elemento chiave del progetto sta proprio nelle unità di ricerca, questi moduli indipendenti che vengono integrati nelle piattaforme per un periodo limitato di tempo secondo il principio di *plug&play*, per essere poi sostituite con nuovi moduli a monitoraggio terminato. Ogni unità lavora indipendentemente dalle altre ma è collegata ad una rete di distribuzione energetica che fa capo all'*Energy Hub*, un'ulteriore unità di ricerca che vuole testare un sistema energetico decentralizzato che gestisce i flussi energetici tra le altre unità, convertendo, stoccando e distribuendo energia. Sotto il profilo energetico, le unità possono simulare la condizione reale di edifici indipendenti esposti a condizioni esterne differenti, con orientamenti non sempre ottimali; la rete di collegamento dell'*ehub* permette così il trasferimento di energia dalle unità / edifici che per la loro collocazione ed innovazione tecnologica testata producono un surplus di energia verso quelle unità / edifici con esposizioni sfavorevoli e che per loro concept progettuale non producono autonomamente energia rinnovabile. (EMPA)

Come precisa Enrico Marchesi in una intervista condotta ai fini della ricerca⁶, il NEST vuole essere un *ponte* tra ricerca e pratica, un luogo in cui gli *innovation managers* come lui costruiscono uno *stage* dove sono gli altri ad operare:

"it is really important to know that the research, the developments, the prototypes are not made by NEST. We just try to run the show. We try to identify topics, we try to identify partners, sometimes we bring them together. That is the major part of my job, to make this thing happen, to make NEST work." (Marchesi, 2020)

Le innovazioni tecnologiche sono il frutto della collaborazione di centri di ricerca universitari ed industria ed è loro il compito di progettare le unità, costruirle e monitorarle, seguendo un processo di innovazione strutturato in sei fasi regolarmente verificate dal team NEST: l'ideazione, il concept, la progettazione, la costruzione, il monitoraggio e la decostruzione. (Richner et al., 2018)

6. Per approfondire si consulti la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

(a destra)
vista sud est di NEST
fotografia di Zoëy Braun



Tra le unità attualmente coinvolte nel progetto NEST, quattro su nove adottano soluzioni fotovoltaiche integrate in facciata, il che suggerisce come l'interesse verso il BIPV si stia lentamente diffondendo.

/ SolAce

In questa sede verrà analizzato *SolAce*, un modulo destinato ad uso residenziale per una coppia di ricercatori, installato nel 2018 ed attualmente ancora in fase di monitoraggio.

Ogni unità integrata nel NEST può seguire uno schema organizzativo differente e funge da supporto per la verifica di nuove tecnologie; talvolta nella stessa unità vengono monitorate soluzioni appartenenti a progetti differenti, altre volte, invece, un'intera unità ospita un sistema di tecnologie più complesso interamente progettato dallo stesso ente di ricerca. *SolAce* appartiene a questa seconda categoria, in cui vengono monitorate alcune tecnologie sviluppate dal *Laboratoire d'énergie solaire et physique du bâtiment* LESO-PB della EPFL di Losanna, diretto dal professor Jean-Louis Scartezzini: tra queste, vetrate colorate con sottili multistrato nanometriche prodotte con deposizione atomica ed ottimizzata per sistemi fotovoltaici e termici; vetrate con rivestimento selettivo per un maggiore isolamento termico; vetrate con microstrutture 3D incorporate ed invisibili all'occhio umano per il reindirizzamento di luce/calore verso il soffitto per un'illuminazione diffusa; sensore di rilevamento di visione High Dynamic Range (HDR) per monitorare istantaneamente le condizioni di illuminazione di un ambiente di ufficio. (EPFL LESO)

SolAce è una unità residenziale progettata dallo studio di architettura Lutz Architects in cui il rivestimento di facciata consiste in moduli fotovoltaici e collettori termici di colore azzurro - verde che adottano la tecnologia Kromatix, una soluzione sviluppata e brevettata dal gruppo di ricerca LESO-PB ed attualmente commercializzata da SwissINSO. Al di là della tecnologia innovativa che riceverà un approfondimento successivo, è importante sottolineare in questo progetto un processo innovativo che pone il BIPV in una posizione intermedia tra sfere di competenza diverse. Dal confronto condotto con Pietro Florio⁷ emerge infatti l'importanza della collaborazione con uno studio di architettura che deve essere capace di intravedere le potenzialità del BIPV e saperle gestire, sviluppando un progetto che dal concept di facciata iniziale fino al progetto esecutivo rispetti i

7. Per approfondire si consulti la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

(a destra)
vista dell'unità mobile *SolAce*
fotografia di Roman Keller

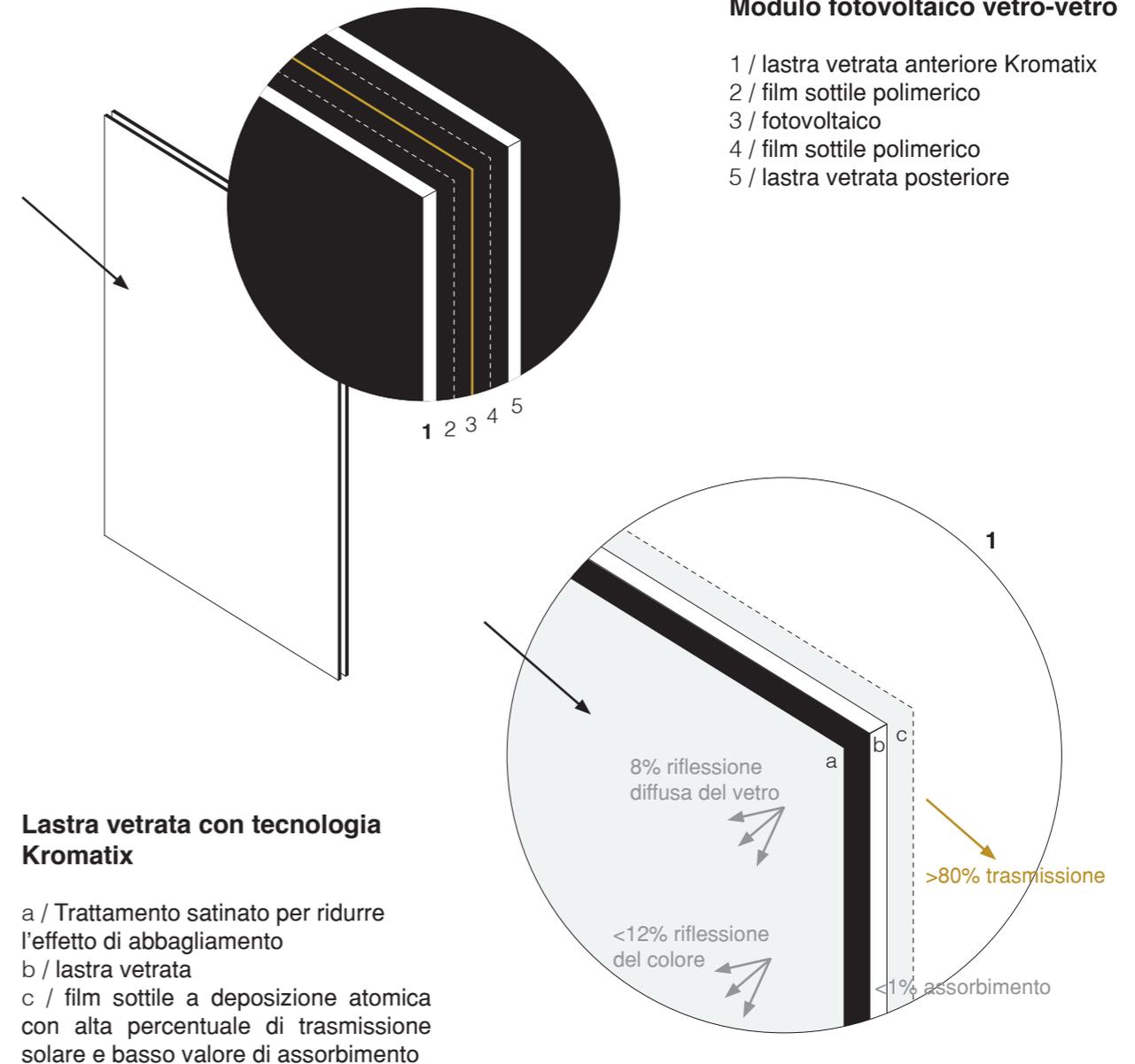


principi della tecnologia fotovoltaica; se la “cultura dell’innovazione” è stata portata dalla ricerca universitaria, sul fronte opposto è stato compito degli architetti collocarla in un contesto reale, l’integrazione in un edificio. (Florio, 2020)

Questo trasferimento da ricerca applicata a progetto di architettura è, però, il frutto di una collaborazione necessaria con SwissINSO, una azienda che lavora in collaborazione con l’EPFL da circa un decennio e che si prefigge il chiaro obiettivo di “seguire l’innovazione tecnologica”, prediligendo lo sviluppo e la produzione di tecnologie solari dal carattere innovativo.

/ Approfondimento

Come ha evidenziato la trattazione dei capitoli precedenti, l’evoluzione e gli sviluppi attorno al BIPV oggi si focalizzano sull’aspetto formale della soluzione, cercando di celare le celle fotovoltaiche dietro pannelli vetrati opachi. Il trattamento di colorazione dei moduli, che viene generalmente effettuato con stampa su vetro-ceramica o serigrafia con perdite di efficienza energetica fino al 50%, rappresenta in questo caso il punto di forza ed il carattere di innovazione della soluzione. I moduli Kromatix si differenziano dai “tradizionali” pannelli fotovoltaici colorati per l’uso di una nanotecnologia a deposizione atomica: in altre parole, sul pannello di vetro vengono applicati dei rivestimenti atomici con ordini di grandezza del nanometro che combinano un riflesso colorato ad un basso indice di rifrazione, che in tal modo impedisce la riflessione della luce. Sul lato interno del pannello viene applicato un rivestimento multistrato sottile che ne produce il colore, per cui non si presenta il rischio di alterazione cromatica dovuta all’esposizione solare prolungata (che può verificarsi con pigmenti di colore e tinture); questo film sottile a base atomica ha un’alta percentuale di trasmissione solare, variabile tra l’85% ed il 90% ed un basso valore di assorbimento. Sul lato esterno del modulo, invece, un trattamento satinato riduce l’effetto di abbagliamento. Il risultato è un pannello vetrato colorato e opaco che, pur celando la tecnologia fotovoltaica, non ne riduce l’efficienza energetica. (SwissINSO) (EPFL LESO) (Hody Le Caër V., Schüler A., 2014)



(fonte:
<https://www.swissinso.com/>;
 rielaborazione grafica)

efficienza modulo Kromatix ~15-16%
 efficienza modulo PV standard ~20%

La realizzazione del laboratorio NEST rappresenta una chiara dimostrazione di quel modello di innovazione dal carattere sinergico introdotto in precedenza, in cui è la ricerca a creare le condizioni perché imprese come SwissINSO, che puntano all'innovazione tecnologica, possano investire in nuovi componenti e fornire risposte ad un mercato già in trasformazione; è chiaro, però, che questa condizione di collaborazione a vantaggio della transizione energetica del patrimonio edilizio ha valore solo quando, in primis, il progettista è disposto ad accettarla e a valorizzarla.

Parafrasando alcuni passaggi di *La materia dell'invenzione* di Ezio Manzini, (Manzini, 1986) in cui il filo conduttore è l'analisi delle possibilità offerte dai nuovi materiali ed il rapporto con l'invenzione, è possibile concludere questo paragrafo con un parallelismo capace di allontanare da precise collocazioni temporali gli edifici dimostratori, e più in generale il panorama del fotovoltaico integrato, e vederli come un esempio concreto di pensieri espressi già nel 1986. Quando Manzini si riferisce a nuovi materiali, sta considerando gli sviluppi tecnico-scientifici che da un lato hanno permesso l'evoluzione di materiali tradizionali, come la metallurgia e le ceramiche che aumentano le loro prestazioni, dall'altro la diffusione di materiali più complessi come i compositi, in cui i materiali che compongono l'oggetto sono integrati al punto da non essere più distinguibili. Nel campo dei materiali a cui si riferisce Manzini, la loro evoluzione è frutto di nuovi processi produttivi che si allontanano dal pensiero tecnico tradizionale, basato sulla scomposizione del problema in elementi semplici e la successiva ricomposizione meccanica, per avvicinarsi al concetto di "processo non lineare", in cui gli elementi fondanti degli oggetti dall'alto contenuto innovativo non sono i singoli componenti di quell'oggetto, bensì le relazioni tra le parti, il sistema organico con cui queste si interfacciano; *"la "materia" del progetto e dell'invenzione può così presentarsi sotto la forma di un processo"*, precisa Manzini riferendosi alla produzione di un composito. Inoltre, in un periodo in cui gli sviluppi tecnico-scientifici non avevano trovato una corrispondenza in linguaggi e pratiche progettuali adeguate, quei nuovi materiali con alto potenziale di innovazione necessitavano di un modello di pensiero capace di comprenderne la complessità e superare l'"inerzia culturale". Trasferendo i ragionamenti di Manzini da quei nuovi prodotti all'ambito di ricerca del fotovoltaico integrato, il BIPV può essere inteso come un prodotto dal carattere più com-

plesso, la cui riuscita è da ascrivere ad una lettura più estesa dei processi non lineari che lo compongono. È proprio in questa logica che dal modello svizzero, ed in particolare gli esempi di sperimentazione tra ricerca, imprese e professionisti, emerge quella visione interdisciplinare che tenta di rafforzare il rapporto tra l'innovazione tecnologica, l'evoluzione tecnica e produttiva ed i linguaggi formali.

/ Conclusioni

Le domande alle quali il seguente lavoro di tesi ha cercato di dare una risposta hanno permesso di costruire un racconto ragionato sul Building Integrated Photovoltaics, ed in senso lato sull'innovazione tecnologica nel progetto di architettura, tentando di individuare quelle che nel libro di Nicola Sinopoli "La tecnologia invisibile. Il processo di produzione dell'architettura e le sue regie" vengono definite come tecnologie visibili e invisibili, i prodotti innovativi fisicamente visibili (come possono esserlo gli edifici) ed "i saperi, l'organizzazione e l'intelligenza che concorrono alla realizzazione di un progetto di architettura" (Sinopoli, 2002)

In tal senso la ricerca ha seguito un andamento crescente avviato con l'analisi dell'attuale contesto di transizione energetica, è passato attraverso il segmento visibile dell'innovazione BIPV, di quelli che sono i suoi prodotti visibili e le forme dell'architettura che li ospita e li fa propri, per poi investigare gli approcci che hanno guidato verso tali prodotti e le relazioni che governano tali processi.

Il cambio di interpretazione dell'impianto fotovoltaico sugli edifici, supportato da una più profonda variazione di significato del ruolo degli edifici all'interno di comunità energetiche, è stato riconosciuto come il frutto di un'innovazione tecnologica che sta investendo l'ambito fotovoltaico dai primi anni Settanta e che, in tal modo, sta garantendo nuovi linguaggi per il progetto di architettura. A tal proposito, lo studio dello stato dell'arte delle architetture BIPV ha messo in luce i principali caratteri di innovazione dei prodotti BIPV disponibili in commercio, tra cui le caratteristiche fisiche e di aspetto, identificandone, pertanto, i nuovi requisiti che stanno favorendo il trasferimento tecnologico nel mercato delle costruzioni: gli architetti, oggi, possono avvalersi di ulteriori prodotti da costruzione con la duplice funzione di produzione energetica e che, per merito di una continua innovazione tecnologica, si presentano come prodotti sempre customizzati.

La prevalenza di tali progetti di architettura delimitata in specifici contesti ha posto le basi per una ricerca mirata a riconoscere le caratteristiche proprie di tali territori, arrivando a identificare l'innovazione tecnologica di tali prodotti come il risultato di una più profonda innovazione dei processi: sono stati rilevati in tal modo nuovi approcci innovativi di tipo sinergico, in cui l'innovazione tecnologica del fotovoltaico è stata riconosciuta come il frutto degli sforzi congiunti tra il mondo della ricerca, dell'industria e degli architetti, orientati verso obiettivi comuni. Il progetto di architettura, pertanto, diventa la rappresentazione di tale innovazione tecnologica e culturale, che in determinati contesti sta già modificando l'immagine ed il ruolo degli edifici e l'architetto, quindi, ne diventa il suo sperimentatore.

/ Bibliografia

(2002/91/CE) Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:EN:PDF>

(2010/31/UE) Direttiva 2010/31/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>

(2012/27/UE) Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>

(2018/844/UE) Direttiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844>

(2020targets) Tabella riassuntiva dei targets energetici europei fissati per il 2020, sito web *reteclima.it* <https://www.reteclima.it/wp-content/uploads/OVERVIEW-OF-EUROPE-2020-TARGETS.pdf>

(Aguacil Moreno 2019) Aguacil Moreno S., *Architectural Design Strategies for Building-Integrated Photovoltaics in Residential Building Renovation* tesi di dottorato in Architettura e Scienze Urbane, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, aa. 2019, relatore professor Emmanuel Rey

(Bardin S. *et al.*, 1992) Bardin S., Blachèr G., Davidson C.H., Are Research Results Used in Practice? This study, adopting a hands-on approach, assesses what is actually happening to building research in practice, based on a survey carried out in France, in "*Building Research and Information*" n. 21, 347-354, 1993

(bda-bund.de) sito web del Bund Deutscher Architektinnen Und Architekten *bda-bund.de*, ultima consultazione in data 29.12.2020, <https://www.bda-bund.de/awards/wohnanlage-richter-muenchen/>

(Bellicini, 2019) Bellicini L., Le resistenze delle costruzioni all'aumento della produttività e all'innovazione, pubblicazione il 1.01.2019, sito web *cresme.it*,

ultima consultazione il 12.12.2020 <http://www.cresme.it/it/articoli/23/le-resistenze-delle-costruzioni-allaumento-della-produttivita-e-allinnovazione.aspx>

(Bellicini 2020) Bellicini L., seminario tenuto in data 6/10/2020 durante il corso di "Innovazione tecnologica nel progetto di architettura off-site" del professore Guido Callegari nel corso di Laurea Magistrale *Architettura per il progetto sostenibile* offerto dal Politecnico di Torino

(Beltramo, Duglio 2009) Beltramo R., Duglio S., La corretta gestione energetica nei rifugi alpini della Valle d'Aosta, in "*gestione energia*" n.1, 14-20, 2009

(Benemann 2015) Benemann J., The story of developing Solar Glass Facades, pubblicazione il 10.08.2015, sito web *energyprofessionalsymposium.com*, ultima consultazione il 13.04.2021 <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=16533>

(bipv.ch) Piattaforma di ricerca *Building Integrated Photovoltaics* gestita da Svizzera Energia in collaborazione con SUSPI <http://www.bipv.ch/index.php/it/>

(Bonomo, 2020) Bonomo P., confronto condotto ai fini del lavoro di tesi in data 6/11/2020. Per approfondire si veda la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

(BPIE 2011) Buildings Performance Institute Europe, *Europe's buildings under the microscope*, 2011 ISBN: 9789491143014

(BRESAER) *Breakthrough solutions for adaptable envelopes for building refurbishment* BRESAER, progetto coordinato da Acciona Construcción Sa e finanziato dall'Unione Europea

» <https://cordis.europa.eu/project/id/637186/it>

» <http://www.bresaer.eu/>

» <https://www.cencenelec.eu/research/CWA/Pages/default.aspx>

(Brito *et al.* 2017) Brito M. C., Freitas S., Guimaraes S., CATita C., Redweik P., The importance of facades for the solar PV potential of a Mediterranean city using LiDARdata, in "*Renewable Energy*" vol.111, 85-94, 2017 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.085>

(Brundtland 1987) Rapporto Brundtland e definizione di "sviluppo sostenibile", sito web *eur-lex.europa.eu*, ultima consultazione il 3.01.2021 https://eur-lex.europa.eu/summary/glossary/sustainable_development.html?locale=it

(CA EPBD 2014) H. Erhorn, H. Erhorn-Kluttig, *Selected examples of Nearly Zero-Energy Buildings. Detailed Report*, 2014, https://systemevergreen.ch/wp-content/uploads/2018/04/CT5_Report_Selected_examples_of_NZEBs-final.pdf

(Campioli, 2011) Campioli A., Qualità dell'architettura: innovazione, ricerca tecnologica e progetto, in "*TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*" n. 1, 62-69, 2011

(Campioli, Lavagna, 2013) Campioli A., Lavagna M., *Tecniche e architettura*, Novara, De Agostini Scuola SpA, 2013

(Casamonti 2008) Casamonti M., *Jean Nouvel*, Milano, Motta Architettura, 2008

(Change 2009) Change T., Towards sustainable residential communities; the Beddington Zero Energy Development (BedZEB) and beyond, in "*Environment and Urbanization*" vol.21, 527-544, 2009, doi.org/10.1177/0956247809339007

(Clua Longas 2019) Clua Longas A., *Design Energy-Efficient Façade to Meet Energy Transition Targets*, tesi di dottorato in Architettura e Scienze Urbane, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, aa. 2019, relatore professor Emmanuel Rey

(Costantini, Norsa, 1985) Costantini M., Norsa A., *Prospettive di politica tecnica in edilizia. Produzione e qualità*, Milano, Franco Angeli, 1985

(CPR 305/2011) Regolamento (UE) 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:088:0005:0043:IT:PDF>

(Crassard, Rode, 2007) Crassard F., Rode J., *The evolution of building integrated photovoltaics (BIPV) in the German and French technological innovation systems for solar cells*, Master in Management ed Economia dell'Innovazione, Chalmers University of Technology, aa. 2007, ESA Report 2007:16 ISSN 1404-8167

(CURTIS 1996) Curtis W., *L'architettura moderna dal 1900*, Phaidon, 1996, terza edizione

(Diwania S. *et al.*, 2019) Diwania S., Agrawal S., Siddiqui A. S., Singh S. Photovoltaic-thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement, in "*International Journal of Energy and Envi-*

ronmental Engineering” 2019 <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y>

(Dwivedi et al. 2019) Dwivedi P., Sudhakar K., Soni A., Solomin E., Kirpichnikova I, Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art, in “*Case Studies in Thermal Engineering*”, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>

(E2VENT) *Energy Efficient Ventilated Façades for Optimal Adaptability and Heat Exchange enabling low energy architectural concepts for the refurbishment of existing buildings*, E2VENT, progetto coordinato da Nobatek Inef 4 e finanziato dall’Unione Europea <https://cordis.europa.eu/project/id/637261/it>

(ec.europa.COP21) Accordo di Parigi, sito ufficiale dell’Unione Europea [ec.europa.eu](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it), ultima consultazione il 2.01.2021 https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it

(Eiffert, Kiss, 2000) Eiffert P., Kiss G., *Building-Integrated Photovoltaic. Designs for Commercial and Institutional Structures. A Sourcebook for Architects*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Report BERL/BK-520-25272, 2000

(EMPA) NEST – building the future together, EMPA, in “*Empa Quarterly*” n.52, 2016 ISSN 2297-7414

(EN 50583) EN 50583-1, *Photovoltaics in Buildings - Part 1: BIPV Modules.*, 2016

(Energiesprong) Organizzazione olandese di sviluppo no profit per la riqualificazione del settore edilizio

» <https://energiesprong.org/>

» https://energiesprong.org/wp-content/uploads/2017/04/EnergieSprong_UK-Transition_Zero_document.pdf

» <http://www.ppan.it/stories/lezione-olandese-energiesprong-a-rebuild-spiega-come-funziona-il-business-del-retrofit/>

» Deliverable 5.1 Report on the scenario identified, STUNNING, 2018, https://renovation-hub.eu/wp-content/uploads/2019/09/D5.1_FINAL-17.pdf

(EPFL LESO) NEST SolAce – EnergyPlus and Low Carbon Combined Living/Working Space, sito web epfl.ch, ultima consultazione il 18.12.2020 <https://www.epfl.ch/labs/leso/research/resources/next-solace/>

(Erban 2016) Erban C., *BIPV Standard EN 50583 “Photovoltaics in Buildin-*

gs” released – Structure, Content, Relevance, 2016 <https://www.researchgate.net/publication/312117055>

(Està, 2020) Il Green Deal conviene. Benefici per economia e lavoro in Italia al 2030, pubblicazione il 7.10.2020, sito web assesta.it, ultima consultazione il 13.12.2020 <http://assesta.it/new-site/wp-content/uploads/2020/11/Green-Deal.-Benefici-occupazionali-1.pdf>

(ETIP 2019) *Solar Skins: An opportunity for greener cities*, European Technology & Innovation Platform (ETIP PV), Solar Power Europe, 2019 <https://etip-pv.eu/about/working-groups/integrated-pv/>

(ETP 2020) IEA, *Energy Technology Perspectives 2020*, pubblicazione in Settembre 2020 sul sito web iea.org, ultima consultazione il 2.01.2021 <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020/etp-model#abstract>

(EU.energy) Commissione Europea, *EU Energy in figures*, 2020 ISSN 2363-247X

(Figliola, 2019) Figliola A., Immaginare il settore delle costruzioni nel 2050. Innovazione tecnologica e verticalità, in “*TECHNE – Journal of Technology for Architecture and Environment*” n. 17, 213-221, 2019 <https://doi.org/10.13128/Techne-23900>

(Fisher, Seacrist, Standley 2012) Fisher G. R., Seacrist M., Standley R. W., Silicon Crystal Growth and Wafer Technologies, in *Proceedings of the IEEE*, n. 100, 1454-1474, 2012

(Florio, 2020) Florio P., confronto condotto ai fini del lavoro di tesi in data 3.11.2020. Per approfondire si veda la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

(Freitas, Brito 2019) Freitas S., Brito M. C., Solar Facades for future cities, in “*Renewable Energy Focus*” vol. 31, 73-79, 2019 <https://doi.org/10.1016/j.ref.2019.09.002>

(GAP Solution)

» Soluzione tecnologica Gap Solution ed intervento di riqualificazione del complesso Dieselweg <http://www.gap-solution.at/>

» *Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings Building Renovation Case Studies* in “IEA ECBCS Annex 50: Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings”, International Energy Agency (IEA), Energy Conservation in Buildings and Community

Systems (ECBCS), 2011, ISBN 978-3-905594-61-4

» Adolfsson L., Andersson C., *Multi-active Facades for Renovation of Million Program Houses. An analysis from Energy and Life Cycle Cost Perspectives*, tesi magistrale in *Energy-efficient and Environmental Buildings*, Università di Lund, Svezia, aa. 2015/16, relatori Åke Blomsterberg ed Emma Karlsson

(HCLA) sito web di HCL Architects *hcla.co.uk*, ultima consultazione in data 26.11.2020 <http://www.hcla.co.uk/projects/type/740-fulham-road>

(Heinstein, Ballif, Perret-Aebi, 2013) Heinstein P., Ballif C., Perret-Aebi L., *Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths*, in "Green" n.3 (2), 125-156, 2013 DOI: <https://doi.org/10.1515/green-2013-0020>

(Herzog, Krippner, Lang, 2017) Herzog T., Krippner R., Lang W., *Facade Construction Manual*, Detail Business Information GmbH, 2017, seconda edizione

(Hirschl 2005) Hirschl B. in collaborazione con Thierfelder B., Schultze C., Kuhn J., Schächtele K., Kirshman H. Frankl P., Manca E., Hermannsdörfer I., *Acceptability of Solar Power Systems. A Study on Acceptability of Photovoltaics with Special Regard to the Role of Design*, 2005, ISBN 3-932092-81-3

(Hody Le Caër V., Schüler A., 2014) Hody Le Caër V., Schüler A., (2014) *Laminated glazing coloured reflection and high solar transmittance suitable for solar energy system* (brevetto europeo n. WO 2014/045141) OrbitExpress <https://express.orbit.com/>

(Humm, Toggweiler, 1993) Humm O., Toggweiler P., *Photovoltaik und Architektur / Photovoltaics and Architecture*. Berlino, Birkhäuser editore, 1993

(IEA data) IEA, dati e statistiche disponibili al sito *iea.org*, ultima consultazione il 3.01.2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>

(IEA Global Status 2019) IEA, *Global Status Report for Buildings and Construction*, 2019 <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2019>

(IEA Review 2020) Global Energy Review 2020. The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO2 emissions, pubblicazione in Aprile 2020 sul sito web *iea.org*, ultima consultazione in data 2.01.2021 <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>

(IEA Smart Grids 2011) IEA, *Technology Roadmap. Smart Grids*, 2011 <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-smart-grids>

(IEA Tracking Buildings 2020) IEA, *Tracking Buildings 2020*, pubblicazione in Giugno 2020 sul sito web *iea.org*, ultima consultazione il 2.01.2021 <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2020#>

(iec.udel.edu) sito web dell'Institute of Energy Conversion *iec.udel.edu*, ultima consultazione in data 2.01.2021, <https://iec.udel.edu/about/history/>

(IPCC 2001) IPCC, *Climate Change 2001: Impacts. Adaption and Vulnerability*, 2001 <https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg2/>

(IPCC 2014) IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report*, 2014 <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

(IPCC 2018) IPCC, *Global Warming of 1,5 °C. Summary for Policymakers*, 2018 <https://www.ipcc.ch/sr15/>

(IRENA 2019) IRENA, *Future of Solar Photovoltaic. Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*, 2019 https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf

(IRENA 2021) IRENA, *World Energy Transitions Outlook*, 2021 <https://www.irena.org/publications/2021/March/World-Energy-Transitions-Outlook>

(Jacobsson, Sandén, Bangens 2004) Jacobsson S., Sandén B., Bangens L., *Trasforming the Energy System – the Evolution of German Technological System for Solar Cells*, in "Technology Analysis and Strategic Management", 2004 DOI: 10.1080/0953732032000199061

(Kesch Hutte, 2000)

- » <https://www.myswitzerland.com/it-it/alloggi/la-capanna-kesch/>
- » <https://www.kesch.ch/DE/huette/oekologie.html>
- » <https://www.solaragentur.ch/dokumente/solpr01/SpirigKeschhuette.pdf>

(Kingsgate, 2014)

- » <http://www.hcla.co.uk/projects/type/kingsgate-house>
- » <https://www.romag.co.uk/projects/kingsgate-house/>

(LAST) Laboratorio di Architettura e Tecnologie Sostenibili dell' École Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL, sito web *epfl.ch*, ultima con-

sultazione in data 23.12.2020 <https://www.epfl.ch/labs/last/>

(Legge sul Clima 2020) Commissione Europea, Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law), COM/2020/80 final, 2020 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1588581905912&uri=CELEX:52020PC0080>

(LESO-PB) Laboratorio di Energia solare e fisica degli edifici dell' École Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL, sito web epfl.ch, ultima consultazione in data 23.12.2020 <https://www.epfl.ch/labs/leso/research/>

(Lucido Solar AG) Soluzione tecnologica Lucido Solar e progetti Fent Solare Architektur

» Fent G. (2017) *Hybrid solar collector and method for the operation thereof* (brevetto europeo n. EP3136016B1) OrbitExpress <https://express.orbit.com/>

» sito web [lucido-solar.com](http://www.lucido-solar.com/) <http://www.lucido-solar.com/>

» sito web [solaragentur.ch](https://www.solaragentur.ch/node/933) <https://www.solaragentur.ch/node/933>

» Peter I., Gmür C., Nachhaltiger Wohnraum, in "Ostschweizer Energie-Praxis", 2019 <https://energie.tg.ch/public/upload/assets/85817/Energiepraxis-Okttober19.pdf>

(Makki, Omer, Sabir, 2014) Makki A., Omer S., Sabir H., Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance, in "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 2014 <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.069>

(Manzini, 1986) Manzini E., *La materia dell'invenzione*, Milano, Arcadia, 1986

(Marchesi, 2020) Marchesi E., confronto condotto ai fini del lavoro di tesi in data 2.11.2020. Per approfondire si veda la serie di confronti raccolti al capitolo 3 *Dialoghi: sinergie e modelli di innovazione*

(McKinsey&Company 2021) Global Energy Perspective 2021, pubblicazione in Gennaio 2021, sito web mckinsey.com, ultima consultazione il 18.03.2021 <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2021>

(Montoro *et al.* 2011) Montoro D.F., Vanbuggenhout P., Ciesielska J., *Building Integrated Photovoltaics. An Overview of the Existing Products*

and Their Fields of Application, relazione preparata dalla EPIA (European Photovoltaic Industry Association) nel quadro del progetto finanziato dall'Europa SUNRISE, 2011

(Morini 2015) Morini M., *Architecture and Photovoltaics. Strategies, technologies and novel components for the building envelope*, tesi di dottorato in Recupero dei Contesti Antichi e Processi Innovativi nell'Architettura, Università degli studi di Palermo, aa. 2013 – 2015, coordinatore prof. Emanuele Palazzotto

(Moura *et al.* 2013) Moura P. S., López G. L., Moreno J. I., De Almeida A.T., The role of Smart Grids to foster energy efficiency, in "Energy Efficiency" vol. 6, 621-639, 2013 DOI 10.1007/s12053-013-9205-y

(Munari, Roecker, 2019) Munari M. C., Roecker C., Criteria and policies to master the visual impact of solar systems in urban environments: The LESO-QSV method, in "Solar Energy", vol. 184, 672-687, 2019 <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.031>

(nfp-energie-1001) Aesthetic Power Production: Colourful Photovoltaic Systems to Promote the Development of Solar Energy, disponibile sul sito nfp-energie.ch, ultima consultazione in data 27.12.2020, <https://nfp-energie.ch/en/projects/1001/>

(Oderson 2011) Oderson, *Manual for BIPV Projects*, 2011

(OPENEXP) OpenEXP, *Energy Transition of the EU Building Stock. Unleashing the 4th Industrial Revolution in Europe*, 2016 https://www.openexp.eu/sites/default/files/publication/files/Reports/energy_transition_of_the_eu_building_stock_full_report.pdf

(Osseweijer *et al.* 2018) Osseweijer F. J.W., van den Hurk L. B.P., Teunissen E. J.H.M., van Sark W., GJ.H.M., A comparative review of building integrated photovoltaics ecosystems in selected European countries, in "Renewable and Sustainable Energy Reviews" vol. 90, 1027-1040, 2018, ISSN 1364-0321

(Pacchetto 2020) Pacchetto clima ed energia 2020, sito ufficiale dell'Unione Europea ec.europa.eu, ultima consultazione il 3.01.2021 https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en

(Pacchetto.energia.pulita) Pacchetto energia pulita per tutti gli europei, sito ufficiale dell'Unione Europea ec.europa.eu, ultima consultazione il 3.01.2021 <https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-ener>

[gy-all-europeans_en](#)

(passipedia) Das erste Passivhaus in Darmstadt-Kranichstein, disponibile al sito *passipedia.de*, ultima consultazione il 12.02.2021 https://passipedia.de/beispiele/wohngebaeude/mehrfamilienhaeuser/das_erste_passivhaus_in_darmstadt-kranichstein_deutschland

(passivehouse.database) Passive House Database, disponibile al sito *passivehouse-database.org*, ultima consultazione il 14.04.2021 <https://passivehouse-database.org/index.php>

(Pelle *et al.*, 2020) Pelle M., Lucchi E., Maturi L., Astigarraga A., Causone F., Coloured BIPV Technologies: Methodological and Experimental Assessment for Architecturally Sensitive Areas, in *Energies* 13(17):4506, 2020 <https://doi.org/10.3390/en13174506>

(Perlin 2000) Perlin J., *From Space to Earth. The Story of Solar Electricity*, Ann Arbor, AATEC Publications, 1999, edizione italiana a cura di Cesare Silvi *Dal Sole. L'energia solare dalla ricerca spaziale agli usi sulla Terra*

(Perlin 2004) Perlin J., *The Silicon Solar Cell Turns 50*, 2004 <https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33947.pdf>

(Piano 1986) Piano R., *Dialoghi di cantiere*, Roma, Laterza, 1986

(Prati 2007) Prati C., *Jean Nouvel*, Roma, EdilStampa, 2007

(PVACCEPT 2005) PV ACCEPT, Progetto di ricerca italo-tedesco sostenuto dalla Commissione Europea nell'ambito del programma "Innovation and Small and Medium Sized Enterprises", sito web *pvaccept.de*, ultima consultazione in data 23.12.2020 <http://www.pvaccept.de/pvaccept/eng/index.htm>

(PVPS 15 2020) *Development of BIPV Business Cases. Guide for stakeholders* IEA PVPS, Report Task 15, ISBN 978-3-906042-89-3

(PVPS T15-07 2019) *Coloured BIPV: Market, Research and Development*, IEA PVPS, Task 15, Subtask E, 2019 <https://iea-pvps.org/key-topics/iea-pvps-15-r07-coloured-bipv-report/>

(Regolamento UE 2018) Regolamento (UE) 2018/1999 del Parlamento europeo e del Consiglio https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0001.01.ITA

(RIBA 2009) RIBA, *Principle of Low Carbon Design and Refurbishment*,

2009, ISBN 978 0 9561064 0 7

(Richner *et al.*, 2018) Richner P., Heer Ph., Largo R., Marchesi E., Zimmermann M., NEST – A platform for the acceleration of innovation in buildings, in *Informes De La Construcción* vol. 69 n. 548, 2017 <https://doi.org/10.3989/id.55380>

(Sánchez, Izard, 2015) Sánchez E., Izard L., Performance of photovoltaics in non-optimal orientations: An experimental study, in *Energy and buildings* vol. 87, 211-219, 2015 <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.035>

(Schmid, 2016)

» <https://reneschmid.ch/projekte/mehrfamilienhaeuser/detail/erstes-energieautarkes-mehrfamilienhaus-bruetten>

» <https://www.umweltarena.ch/ueber-uns/architektur-und-bauprojekte/>

» <https://www.espazium.ch/it/attualita/indipendenza-energetica-assicurata>

» https://www.schindler.com/ch/internet/it/schindler-svizzera/downloads/jcr_content/iTopPar/downloadlist/downloadList/10_1561723128230.download.ad.asset.10_1561723128230/schindler-nextfloor-19-01-it.pdf

(Scognamiglio 2017) Scognamiglio A., *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting* Capitolo 6 - BIPV for Cost-Effective Energy-Efficient Retrofitting. Woodhead Publishing, 2017 ISBN: 978-0-08-101227-7

(Sinopoli, 2004) Sinopoli N., *La tecnologia invisibile. Il processo di produzione dell'architettura e le sue regie*, Milano, Franco Angeli, 2004, edizione 3°

(Sinopoli, Tatano, 2002) Sinopoli N., Tatano V., *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, Milano, Franco Angeli, 2002

(solararchitecture.ch) Esempi di riferimento, showcases, disponibile al sito web *solararchitecture.ch*, ultima consultazione il 22.04.2021, <https://solararchitecture.ch/it/>

(solararchitecture.cronologia) BIPV in architettura - 40 anni di evoluzione, disponibile al sito web *solararchitecture.ch*, ultima consultazione il 30.12.2020 <https://solararchitecture.ch/it/cronologia/#1559812646314-b65d885a-36d0>

(solararchitecture.ombreggiamento) Ombreggiamento: barriera o condizione al contorno?, disponibili al sito web *solararchitecture.ch*, ultima consultazione il 27.12.2020 <https://solararchitecture.ch/it/ombreggiamento/>

(Solaris#01) Simon A., Rimboccarsi le maniche, nonostante lo scetticismo,

in "Solaris" n.1, 2018, Hochparterre, edizione italiana, ISSN 2571-8401

(Solaris#03) Simon A., Manca una cultura in materia di architettura solare, in "Solaris#03" n.3, 26-27, 2019, Hochparterre, edizione italiana, ISSN 2571-8401

(Solt 2017) Solt J., Sismografo del cielo, pubblicazione il 16.11.2017, sul sito web *espazium.ch*, ultima consultazione il 27.12.2020 <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/seismograf-des-himmels>

(SwissINSO) sito web *swissinso.com*, ultima consultazione in data 18.12.2020 <https://www.swissinso.com/technology>

(SUPSI 2017) Zanetti I., Bonomo P., Frontini F., Saretta E., van den Donker M.N., Verberne G., Sinapis K., Folkerts W., Vossen F., *Building Integrated Photovoltaics: Product overview for solar buildings skins. Status Report 2017*

(SUPSI 2020) Corti P., Bonomo P., Frontini F., *Building Integrated Photovoltaics: a practical handbook for solar buildings. Status Report 2020*

(Task 41) *Building Integration of Solar Thermal and Photovoltaics – Barriers, Need and Strategies*, IEA SHC Task 41.A.1, 2012

(Task 41.A.2) *Solar Energy Systems in Architecture - Integration Criteria and Guidelines. Subtask A: Criteria for Architectural Integration*, IEA SHC Task 41.A.2, 2013

(Task 41.A.3/2) *Designing Photovoltaics System for Architectural Integration. Criteria and guidelines for product and system developers*, IEA SHC Task 41.A.3/2, 2013

(Teicholz, 2004) Teicholz P., Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies pubblicazione il 14.04.2004, sito web *aecbytes.com*, ultima consultazione il 12.12.2020 http://www.aecbytes.com/viewpoint/2004/issue_4.html

(Teicholz, 2013) Teicholz P., Labor-Productivity Declines in the Construction Industry: Causes and Remedies (Another Look) pubblicazione il 14.03.2013, sito web *aecbytes.com*, ultima consultazione il 12.12.2020 http://www.aecbytes.com/viewpoint/2013/issue_67.html

(Tonelli, 2003) Tonelli C., *Innovazione tecnologica in architettura e qualità dello spazio. Note per un accordo*, Roma, Gangemi editore, 2003

(UNI 8290) UNI 8290, *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico*, 1981

(Viridén, 2016)
» <https://teilnehmer.prixforix.ch/dl/45-C13%20Prixforix%202017%20Virid%C3%A9n%20Partner.pdf>
» <https://www.espazium.ch/it/node/12644>
» <https://www.viriden-partner.ch/plus-nullenergiehaeuser>
» <http://www.bipv.ch/index.php/it/residenziale-s-it/item/1345-viriden-ita>

(Weller B. et al. 2010) Weller B., Hemmerle C., Jakubetz S., Unnewehr S. *Detail Practice: Photovoltaics: Technology, Design, Construction*, Basilea, Birkhäuser, 2010

(World GBC 2019) World GBC, *Bringing embodied carbon upfront*, 2019 <https://www.worldgbc.org/news-media/bringing-embodied-carbon-upfront>

(Zaera-Polo, Trüby 2014) Zaera-Polo A., Trüby S., *Façade*, Venezia, Marsilio, 2014, in "Elements of Architecture" una serie di 15 pubblicazioni di Rem Koolhaas

(Zampino 2013) Zampino M., *Processi di integrazione del fotovoltaico nell'architettura sostenibile*, tesi di dottorato in Ricerca in Progettazione Architettónica e Ambientale, Università degli studi di Napoli Federico II, aa. 2010 – 2013, relatore prof.ssa Antonietta Piemontese

