

# Strategies, Technologies and Novel Components for the Architectural Integration of Photovoltaics

Marco Morini<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> *Dipartimento di Architettura, Edificio 8 Viale delle Scienze, Palermo, 90128, Italia*

---

## Highlights

The research underlines the architectural integration of photovoltaics (PV) as an effective strategy for energy retrofit of the existing building stock and the construction of Zero Energy Buildings. Through the analysis and evaluation of case studies, it was possible to highlight interesting multifunctional solutions from the BIPV market and to define best practices for integration of PV into buildings, with an eye on peculiarities of Mediterranean context. The energy performance of a novel BIPV component was assessed by means of different software analyses, useful to demonstrate the benefits related to the integration of this component into the building envelope.

## Abstract

The research deals with the architectural integration of photovoltaics (PV) for the energy retrofit of the existing building stock and the construction of new Zero Energy Buildings. The objective is the study and subsequent definition of strategies, technologies and novel components for the building envelope integrating photovoltaics, with particular attention towards new generation solar technologies. The work also focuses on the energy optimization and performance analysis of a novel BIPV component for sustainable translucent building envelopes, namely a panel made of glass blocks integrated with 3<sup>rd</sup> generation dye-sensitized solar cells.

## Keywords

BIPV, Photovoltaics, Zero Energy Buildings, Energy Retrofit, Glass Block

---

## 1. INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi decenni, la necessità di ottimizzare le prestazioni energetiche del settore edilizio e di ridurre i consumi da fonti fossili ha portato a un sempre più vasto impiego di fonti di energia rinnovabile negli edifici. Una delle principali sfide, in quest'ambito, è quella legata alla ricerca delle migliori soluzioni per l'integrazione di sistemi per la produzione di energia pulita negli edifici, tenendo in considerazione non soltanto gli aspetti tecnici ed economici dell'installazione, ma anche quelli legati all'aspetto.

La ricerca che si sta conducendo si è concentrata sull'integrazione architettonica del fotovoltaico (FV) per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente e la costruzione di edifici a energia zero (Zero Energy Buildings, ZEB). L'obiettivo primario di tale ricerca è lo studio e la successiva definizione di strategie, tecnologie e componenti innovativi per l'involucro edilizio che integrino la tecnologia fotovoltaica, con particolare attenzione verso le implicazioni derivanti dall'utilizzo di celle solari di ultima generazione. Il lavoro s'inserisce nell'ambito di una ricerca più ampia, coordinata dalla Prof.ssa Rossella Corrao, finalizzata ad indagare le problematiche connesse all'impiego di materiali tecnologicamente avanzati per l'ottimizzazione energetica e l'incremento prestazionale degli elementi di captazione della luce naturale, che ha portato alla definizione tecnologica di un pannello multifunzionale, preassemblato a secco e precompresso in vetromattoni integrati con celle solari di terza generazione [1].

---

\* Corresponding author. Tel.: +39-328-822-7396; e-mail: marco.morini@unipa.it

## 2. STATO DELL'ARTE

Quando si parla di Integrazione Architettonica del Fotovoltaico, si fa riferimento a qualcosa di più rispetto alla “semplice” installazione di prodotti fotovoltaici in corrispondenza di una o più superfici facenti parte di un edificio o ad esso connesse. Nell'integrazione la scelta e lo studio delle caratteristiche del fotovoltaico e della sua installazione diventano parte integrante del processo progettuale, non solo per gli aspetti concernenti la produzione di energia, ma anche, più in generale, per quelli propriamente legati alla funzionalità e all'estetica dell'involucro edilizio. Il modulo fotovoltaico può quindi andare a sostituire elementi tecnici e/o strati funzionali dell'edificio, diventando così una parte integrante della costruzione chiamata non più ad assolvere il solo compito della produzione elettrica, ma anche una serie di altre funzioni tipicamente svolte dagli elementi di un edificio (chiusure e partizioni esterne) fra cui, ad esempio: la protezione dagli agenti atmosferici, l'isolamento termico e acustico, l'attenuazione della luce naturale, la caratterizzazione formale, ecc...

Negli ultimi anni, il settore del *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) – costituito dai prodotti multifunzionali (edilizi e fotovoltaici) per l'integrazione negli edifici – ha visto un sempre più grande numero di soluzioni entrare sul mercato ed è stato caratterizzato da un'assai forte crescita che non sembra destinata ad arrestarsi nel prossimo futuro. Al di là degli ovvi vantaggi ambientali ed economici, legati alla possibilità di generare energia pulita direttamente nei contesti urbani e, in particolare, in corrispondenza dei picchi di domanda (gli edifici) [2], un corretto utilizzo di prodotti BIPV multifunzionali – permettendo di installare con una sola operazione l'impianto FV e l'elemento tecnico e/o strato funzionale sostituito – è in grado di generare anche un risparmio sui costi di costruzione dell'edificio e dei materiali.

I grandi progressi raggiunti nel campo delle tecnologie fotovoltaiche hanno permesso, da un lato, di abbassare i costi per la produzione di moduli solari, dall'altro, di realizzare prodotti sempre più performanti e con nuove caratteristiche, che risultano particolarmente adatte all'integrazione negli edifici: leggerezza, semitrasparenza, flessibilità, varietà di colori, grane e *texture* superficiali, ecc... Questi fattori hanno dato un grandissimo impulso alla *building integration*, che oggi è caratterizzata da una larghissima varietà di soluzioni, standardizzate o *customizzabili* sulla base delle esigenze di ciascun progetto, spesso nate dalla collaborazione fra architetti, ingegneri, aziende del settore edilizio e FV: dalle più comuni tegole solari ai moduli semitrasparenti integrati su vetro per la realizzazione di facciate, coperture, infissi esterni; dai moduli fotovoltaici flessibili, integrati su supporto plastico per la realizzazione dei più svariati prodotti edilizi (cuscini di ETFE, guaine multifunzionali per l'impermeabilizzazione delle coperture di edifici ecc...) ai moduli speciali per la realizzazione di sistemi di facciata, di coperture, ma anche per la realizzazione di partizioni esterne (parapetti, pensiline, ecc...). Alcuni esempi significativi sono mostrati in Figura 1.

Fra le numerose tecnologie FV, quelle di prima generazione, basate sull'impiego di celle (o *wafer*) in silicio mono e policristallino, sono le più diffuse sul mercato anche per quanto riguarda il settore BIPV; ciò è dovuto, da un lato, ai più elevati valori di efficienza dei moduli fotovoltaici (pari a circa il 20% per il silicio monocristallino e al 15% per il silicio policristallino) [3] e, dall'altro, alla diffusa e ormai ampiamente consolidata conoscenza di tale tecnologia.



*Figura 1. Da sx: Copertura in cuscini di ETFE integrati con moduli thin-film dell'AWM Carport, Monaco, Ackermann Architects, 2011 (foto tratta da birdair.com); Moduli in celle in silicio policristallino di colore verde, installati nell'ambito del retrofit di un edificio residenziale del centro di Parigi, Emmanuel Saadi e Jean-Louis Rey, 2011 (foto tratta da glassonweb.com); Moduli vetro-vetro integrati nelle partizioni esterne di una residenza studentesca presso il porto di Aarhus, Arkitema Architects, 2012 (foto dell'autore).*

Nonostante la maggiore efficienza nominale (misurata in condizioni standard di temperatura, intensità e angolo d'incidenza della radiazione solare, che raramente corrispondono a quanto accade nella realtà), i pannelli in silicio cristallino mostrano dei limiti nelle performance in condizioni operative, legati alla maggiore dipendenza dall'angolo d'incidenza dei raggi luminosi rispetto alla giacitura dell'installazione, dall'orientamento e dall'intensità della radiazione solare, nonché un peggiore coefficiente di abbassamento delle performance all'aumentare della temperatura rispetto alle altre tecnologie solari di seconda e terza generazione. Ciò ha fatto sì che impianti realizzati con tecnologie di seconda e terza generazione, dotate di una minore efficienza nominale, abbiano mostrato performance di produzione fotovoltaica (in termini di kWh per kWp di potenza installata) migliori rispetto a impianti in silicio cristallino [4].

È importante inoltre sottolineare come, a differenza di quando si ha a che fare con una "semplice" installazione fotovoltaica – nella quale gli aspetti fondamentali da tenere in considerazione sono quelli legati all'efficienza dei pannelli e alla massimizzazione della produzione dell'impianto – nel progetto d'integrazione risultino di grande rilevanza anche altri aspetti che possono rappresentare un "vincolo" da considerare nella scelta della soluzione fotovoltaica ottimale. Tali aspetti possono riguardare: l'orientamento delle superfici dell'edificio su cui l'impianto troverà collocazione, i materiali utilizzati per l'involucro, la necessità di soluzioni fotovoltaiche più o meno trasparenti, più o meno flessibili, le prestazioni aggiuntive richieste ai pannelli che possono anche essere indirizzate al soddisfacimento di altre esigenze quali, ad esempio, il benessere (isolamento termico-acustico, modulazione della luce naturale), la sicurezza (protezione dall'ambiente esterno, chiusura) e l'aspetto. Parlando proprio delle caratteristiche connesse all'aspetto degli edifici, merita particolare attenzione la tecnologia fotovoltaica di terza generazione delle Dye-sensitised Solar Cells, DSC (letteralmente, "celle sensibilizzate a colorante"), che presenta caratteristiche uniche di versatilità che la rendono particolarmente adatta all'integrazione architettonica, specialmente su substrato trasparente in vetro. Questo è principalmente dovuto all'ampio range di trasparenze e colorazioni, ottenibili semplicemente intervenendo sullo spessore e sulla struttura dei materiali costitutivi (in particolare del semiconduttore, diossido di titanio  $TiO_2$ , e del colorante o *dye*) senza la necessità di ricorrere a qualsiasi altro macchinario per la produzione [5]. Inoltre, un

altro interessante vantaggio è legato alla configurazione bifacciale dei moduli che, quando installati su substrato in vetro, sono in grado di convertire in elettricità l'energia proveniente sia dall'esterno che dall'interno dell'edificio. La possibilità di modulare la trasparenza, il colore e il “disegno” delle celle sulla base delle condizioni geoclimatiche del contesto di installazione dell'impianto, delle scelte progettuali, dei consumi globali previsti per l'edificio e delle esigenze di comfort indoor (illuminazione, isolamento termico) rappresenta un aspetto di fondamentale interesse per la progettazione “integrata” [6]. I moduli DSC offrono elevate prestazioni anche in condizioni di luce diffusa e scarsa luminosità, mantenendo buoni livelli di efficienza anche in luce artificiale (tanto che in molti parlano di una potenzialità anche legata a un utilizzo indoor di tale tecnologia) e in condizioni d'installazione non “orientata”. Tutto questo rappresenta un grande vantaggio nell'ambito dell'integrazione architettonica per questa tecnologia FV che oggi si trova in fase preindustriale e proprio nel settore del BIPV potrà trovare una sua delle principali chiavi di successo.

### 3. METODOLOGIA

Nell'ambito della ricerca, il tema dell'integrazione architettonica del fotovoltaico è stato analizzato sia a livello di prodotto/tecnologia, sia a livello di *concept* e progetto. Per quanto riguarda, in particolare, l'analisi dei prodotti, la ricerca si è concentrata sullo studio del mercato BIPV, sottolineando differenze, limiti e potenzialità di ciascuna tecnologia fotovoltaica e ponendo l'accento sui risultati ottenuti grazie ai progressi tecnologici registrati e alla collaborazione fra industria fotovoltaica ed edilizia. Particolare attenzione, inoltre, è stata rivolta all'analisi di un numero consistente di casi studio, ossia edifici di nuova costruzione o interventi di retrofit, in cui è stato possibile rintracciare interessanti soluzioni per l'integrazione del fotovoltaico. Le numerose informazioni ottenute dall'analisi dei casi studio – dedotte a partire dai dati di letteratura, dalle *reference section* dei siti delle aziende produttrici di sistemi BIPV, nonché da report e database online, spesso elaborati nell'ambito di progetti europei – sono state raccolte in un database. Tale strumento è stato utile per scomporre, organizzare e mettere in relazione la grande varietà d'informazioni sugli edifici oggetto di studio, sui prodotti fotovoltaici o BIPV utilizzati (tecnologia, tipo di substrato, azienda produttrice, nome e specifiche del prodotto, ecc...) e sulle caratteristiche dell'installazione (unità tecnologica coinvolta dall'integrazione/installazione del FV, elemento tecnico e/o strato funzionale sostituito, orientamento e caratteristiche dimensionali dell'impianto, potenza installata, produzione annuale, ecc...). In una seconda fase, ai fini di sintetizzare e illustrare le principali informazioni sui vari progetti oggetto di studio, sono state elaborate delle schede di approfondimento dei casi studio, a partire dalle quali è possibile effettuare delle considerazioni sulla “qualità” delle soluzioni tecniche e progettuali per l'integrazione della tecnologia fotovoltaica. Parallelamente all'analisi dello stato dell'arte, la ricerca è stata altresì caratterizzata da uno studio sperimentale riguardante l'analisi e l'ottimizzazione delle performance energetiche di un componente BIPV innovativo per la realizzazione di involucri traslucidi sostenibili. Si tratta di un pannello in vetromattone integrato con celle solari di terza generazione (DSC), sviluppato dalla SBskin. Smart Building Skin s.r.l., start-up innovativa e spin-off accademico dell'Università di Palermo [7]. Nuove configurazioni del vetromattone –

prodotto edilizio già ben noto sul mercato – sono state implementate dal punto di vista dell’isolamento termo-acustico, a partire da risultati ottenuti in lavori precedenti [8], e integrate con celle DSC. Le prestazioni energetiche (termiche e ottiche) di queste nuove configurazioni sono state analizzate attraverso l’utilizzo di tre differenti software – Comsol Multiphysics [9], Zemax [10] e WINDOW [11] – allo scopo di calcolarne la trasmittanza termica (U value), la trasmissione luminosa nel visibile ( $T_v$ ), la trasmissione di energia solare (g value) e la produzione elettrica.

#### **4. RISULTATI**

A partire dall’analisi dei casi studio è possibile delineare delle “buone pratiche” per il progetto e la scelta delle caratteristiche dei prodotti per una migliore integrazione del fotovoltaico negli edifici, con una particolare attenzione verso le caratteristiche peculiari del settore edilizio nel contesto del Bacino del Mediterraneo, particolarmente favorevole alla diffusione del fotovoltaico per via degli elevati valori di radiazione globale ma anche caratterizzato dalla necessità di adottare una serie di specifiche strategie per la riduzione delle richieste energetiche per il raffrescamento degli edifici. Grazie al numero di casi selezionati e alla catalogazione delle informazioni effettuata, l’analisi dei casi studio ha permesso di fare alcune valutazioni sulle tendenze riscontrate e i nuovi sviluppi; ad esempio, un interessante tema che è stato individuato riguarda le potenziali ricadute “passive” di un’attenta progettazione bioclimatica che tiene conto dell’integrazione fotovoltaica nell’involucro di un edificio, in termini di riduzione dei consumi energetici dello stesso e miglioramento del comfort indoor (termico e visivo). Si pensi, ad esempio, al miglioramento delle condizioni di comfort indoor possibile grazie alla modulazione e/o schermatura della luce naturale fornita da moduli integrati su sistemi frangisole, allo sfruttamento del calore sviluppato nella conversione fotovoltaica per il riscaldamento passivo degli ambienti o per l’attivazione di fenomeni di ventilazione naturale, all’utilizzo nell’involucro di prodotti BIPV caratterizzati da valori di trasmissione luminosa e isolamento termico “progettati” sulla base delle esigenze specifiche dell’edificio, ecc... In questa stessa ottica va visto anche il lavoro che si sta conducendo di analisi e ottimizzazione del pannello multifunzionale e traslucido in vetromattoni integrati con DSC. Una volta definita e verificata la metodologia per il calcolo dei parametri significativi per la caratterizzazione delle prestazioni termiche e ottiche del prodotto, effettuata utilizzando un modulo DSC le cui caratteristiche spettrali sono disponibili nel dettaglio in letteratura [12], la stessa si sta applicando per la valutazione delle prestazioni di varie configurazioni del vetromattone, integrato con moduli DSC caratterizzati da differenti colori, valori di trasmissione luminosa ed efficienza. In questo modo, sarà individuato un range di configurazioni possibili, in grado di fornire prestazioni differenziate, fra le quali i progettisti potranno individuare quelle più efficaci per rispondere a specifiche esigenze legate alle caratteristiche del progetto e del contesto d’installazione (ad esempio, clima, orientamento possibile delle superfici “attive”, prestazioni di trasmissione luminosa e isolamento termico richieste, funzioni svolte all’interno, ecc...). A scopo esemplificativo, si sta valutando quale sia la configurazione del prodotto più adatta per l’integrazione nell’ambito del retrofit di un edificio per uffici, sito nella città di Palermo, caratterizzato da un involucro interamente vetrato e poco efficiente dal punto

di vista energetico. La mancanza di sistemi per la schermatura della radiazione solare (che risulta molto intensa in un contesto geografico come quello della città di Palermo) genera temperature elevate all'interno degli uffici e, conseguentemente, la necessità di mantenere all'interno condizioni accettabili di comfort termico determina elevati costi di gestione per l'alimentazione degli impianti per il condizionamento dell'aria. Attraverso l'utilizzo di un software per il calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici [13], si stanno valutando i benefici, in termini di comfort indoor e risparmio energetico globale dell'edificio, connessi all'integrazione del componente in vetromattone integrato con moduli DSC nella chiusura verticale dell'edificio oggetto di studio. Tali benefici non sono soltanto legati alla produzione fotovoltaica, ma anche all'ottimizzazione delle prestazioni di trasmissione solare della facciata derivate dall'integrazione delle DSC nel vetromattone. Si stanno, inoltre, valutando le eventuali problematiche che tale integrazione potrà comportare.

## 5. CONCLUSIONI

Il progetto d'integrazione del fotovoltaico negli edifici richiede un approccio multidisciplinare e globale alla progettazione che sia in grado di operare una sintesi di una serie di criteri che fanno capo ad aspetti energetici, tecnico-costruttivi, economici ed estetici. Solo in questo modo, il BIPV potrà superare le sfide legate al costo dei prodotti e all'accettazione da parte del grande pubblico, che troppo spesso ne sottovaluta i benefici, e portare a una vera penetrazione del fotovoltaico negli ambienti urbani, una delle chiavi per il raggiungimento degli obiettivi fissati dall'UE per il 2020. È chiara, però, la necessità di un lavoro di ricerca e studio per la diffusione di "buone pratiche" per l'integrazione e la definizione delle soluzioni migliori per ciascun contesto e progetto, oltre che di un calcolo dei costi e dei benefici. In quest'ambito, la ricerca intende fornire il suo contributo promuovendo l'uso del FV per l'approvvigionamento energetico degli edifici, al fine di migliorarne l'efficienza energetica (attraverso sia la riduzione dei consumi sia la produzione elettrica) senza tralasciare, però, gli aspetti della qualità architettonica e della salvaguardia ambientale.

## 6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] R. Corrao, M. Morini, L. Pastore, A hybrid solar cells integrated glass block and prestressed panel made of dry-assembled glass blocks for the construction of translucent building envelopes, PCT No. WO 2013132525 A2.
- [2] A. Scognamiglio, P. Bosisio, V. Di Dio, a cura di, Fotovoltaico negli edifici. Edizioni Ambiente, Milano, IT, 2009.
- [3] P. Heinstejn, C. Ballif, L. Perret-Aebi, Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. *Green* 3(2) (2013), 125-156. doi: 10.1515/green-2013-0020.
- [4] T. Toyoda, et al., Outdoor performance of DSC large scale panels, *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 164, 203-7 (2004).
- [5] H. Desilvestro, M. Bertoz, S. Tulloch, G. Tulloch, Packaging, scale-up and commercialization of Dye Solar Cells. In K. Kalyanasundaram, (Ed.), *Dye-sensitized solar cells*, 207-250, EPFL Press, Lausanne, CH, 2009. ISBN 978-2-940222-360-0.
- [6] R. Corrao, D. D'Anna, M. Morini, L. Pastore, DSSC-integrated glassblocks for the construction of multifunctional translucent photovoltaic panels, in *Solar Building Skins. Conference Proceedings of 7<sup>th</sup> ENERGY FORUM*, 79-83. ISBN 978-3-98129535-0.
- [7] [www.sbskin.it](http://www.sbskin.it).
- [8] D. Cappello, M. Beccali, R. Corrao, P. Mannino, Nuove configurazioni del vetromattone. Simulazioni dinamiche per la valutazione delle prestazioni ottiche e termiche. *Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro*, 41 (5), 2011, 5-14.
- [9] Comsol, Comsol Multiphysics® (4.4), 2013 [Computer Software]. <http://www.comsol.com>.
- [10] Radiant Zemax LLC, Zemax, 2009 [Computer Software]. <http://www.zemax.com>.
- [11] Lawrence Berkeley National Laboratory, WINDOW (7.2), 2014 [Computer Software]. <http://windows.lbl.gov>.
- [12] S. Wenger, M. Schmid, G. Rothenberger, A. Gentsch, M. Grätzel, J. O. Schumacher, Coupled Optical and Electronic Modeling of Dye-Sensitized Solar Cells for Steady-State Parameter Extraction, *Journal of Physical Chemistry C*, 115 (2011), 10218-0229. doi: 10.1021/jp111565q;
- [13] DesignBuilder Software Ltd., DesignBuilder (4), 2014 [Computer Software]. <http://designbuilder.co.uk>.