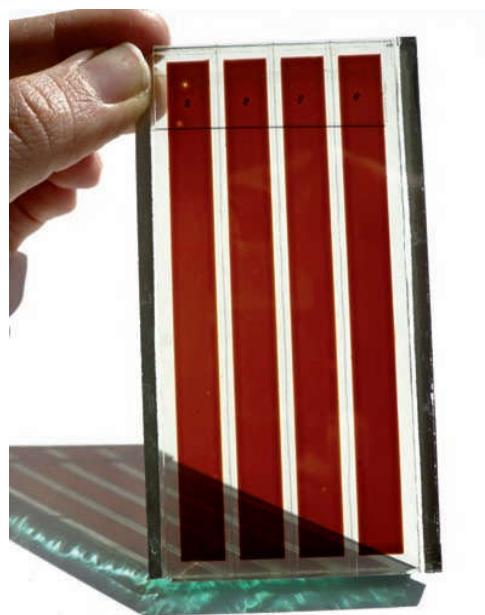


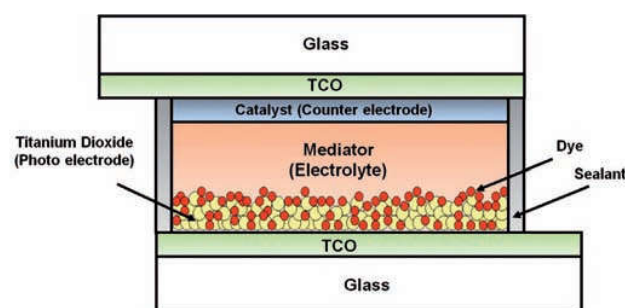
La risorsa principale che la natura ci offre, il sole, è stato oggetto nel corso degli ultimi anni di uno studio continuo che ha portato ad ottimizzare i materiali, le tecnologie e i processi con l'obiettivo di captare, conservare e trasformare in modo più efficiente l'energia solare in una forma di energia più fruibile. Questo interesse, se da un lato ha contribuito alla sperimentazione e alla ricerca di nuove tecnologie e nuovi materiali, dall'altro si è tramutato in una corsa sfrenata che ha portato ad un'ingente installazione di pannelli fotovoltaici su campi non coltivabili e soprattutto sui tetti delle nostre città. La potenzialità delle tecnologie fotovoltaiche di essere appunto integrate negli edifici, ha dato vita ad una continua ricerca di incentivi e finanziamenti propedeutici alla sostenibilità economica dell'iniziativa. L'uso in particolare dei tetti fotovoltaici è stato guidato dalla Direttiva Comunitaria 2001/77/CE divenuta poi in Italia Decreto legislativo 387/2003 dal quale sono nati i 5 Conti Energia che si sono fino ad oggi susseguiti. Le tecnologie fotovoltaiche più diffuse e già commercializzate sono quelle basate sull'utilizzo del silicio monocristallino, policristallino ed amorfo (*thin film*), tecnologie che hanno condizionato negli ultimi anni le scelte architettoniche e progettuali degli addetti ai lavori. Al fine di massimizzare l'energia prodotta da un dispositivo fotovoltaico tradizionale, è necessario che il pannello abbia un orientamento considerato ottimale (sud). E' quantificabile al 5% la perdita di energia provocata da un'angolazione diversa da quella ottimale. Inoltre le installazioni sono effettuate tenendo conto di una data inclinazione, che rispetto ai tetti di norma è del -10%, ma comunque strettamente legata alla latitudine del luogo in cui si agisce. In condizioni standard (1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura modulo di 25°C), una copertura fotovoltaica otterrebbe un'efficienza oscillante tra il 10 e il 12,5%, calcolato con la formula  $\eta = P_{FV} / P_{LI} * A$ , dove  $\eta$  è l'efficienza (%), A è l'area del modulo (m<sup>2</sup>), P<sub>FV</sub> la potenza elettrica generata dal modulo fotovoltaico (W) e P<sub>LI</sub> la densità di potenza luminosa (W/m<sup>2</sup>) irraggiante il modulo stesso in condizioni standard (STC) (F. Groppi, C. Zuccaro, (2005) Impianti Solari Fotovoltaici a norma CEI; Editoriale Delfino). Il BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) è divenuto nel corso degli ultimi anni la massima espressione dell'integrazione delle tecnologie fotovoltaiche all'interno di edifici e fabbricati, dove gli studi e le sperimentazioni in materia hanno trovato una nuova spinta, favorite soprattutto dalla valorizzazione ed enfattizzazione delle caratteristiche estetiche associate a quelle prestazionali. Di contro, continua ad essere elevato il rischio di snaturare l'estetica e l'architettura delle nostre città che a causa di installazioni fotovoltaiche indiscriminate, tendono a perdere la loro identità.



## FOTOVOLTAICO ORGANICO

l'integrazione architettonica delle celle a colorante organico (DSC): i parapetti fotovoltaici

M.L. FIORENTINO, V. PASCASI, G. CEPARULO, R. RICCELLETTI, F. GIANNINI, A. DI CARLO



### MODULO PAROLE CHIAVE

**DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSC) – PARAPETTI FOTOVOLTAICI - VERNICI SOLARI**  
**FOTOVOLTAICHE – INCHIOSTRO DI SILICIO - PANNELLI DI SILICIO AMORFO SEMITRASPARENTE**  
**- POLO SOLARE DELLA REGIONE LAZIO CHOSE (CENTER FOR HYBRID AND ORGANIC SOLAR ENERGY) – DYEPower -**

## I contesti urbani sono segnati, talvolta, dalla diffusione invasiva del fotovoltaico, fino a oggi ... scarsamente integrato. La tecnologia DSC in primo piano

Per questo scopo sono stati sviluppati materiali e tecnologie fotovoltaiche innovative, caratterizzate soprattutto da un impatto meno marcato sul contesto di installazione. Tra questi ha suscitato sicuramente importante attenzione la sperimentazione di vernici solari fotovoltaiche, note come "Inchiostro di silicio" (H. Antoniadis, High Efficiency, Low Cost. Solar Cells Manufactured Using 'Silicon Ink' on Thin Crystalline Silicon Wafers; NREL March 2011). Quest'ultimo è composto da nanoparticelle di silicio del diametro variabile e compreso tra i 5 e i 25 nm, sperimentato presso il National Renewable Energy Laboratory (NREL) di Denver. Questo inchiostro ha come prospettiva un largo utilizzo su elementi diversi, tra cui i tetti, al fine di rendere tale superficie attiva e captante, ed in grado di raggiungere un rendimento circa del 18%.

Ancora di nuova sperimentazione i pannelli di silicio amorfo semitrasparente su cui lavora da tempo la Sharp. L'azienda ha lanciato in Giappone questa nuova tecnologia basata sull'utilizzo di un vetro laminato infuso, al cui interno vengono incapsulate celle fotovoltaiche di tipo thin film (<http://www.sharp.co.jp/corporate/news/120925-a.html>). Questi particolari dispositivi, il cui valore di efficienza è di 9,5% possono raggiungere una potenza di picco massima di 95 W.

Tra le tecnologie che negli ultimi anni hanno suscitato il maggiore interesse, ci sono senza dubbio le tecnologie fotovoltaiche di terza generazione, basate sull'utilizzo di materiali di origine organica. Tra queste, quella che appare più promettente e prossima alla fase di industrializzazione è quella delle celle solari di tipo DSC (B. O'Regan, M. Grätzel (1991) A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films; Nature, vol. 353, Oct. 24, 1991, p. 737-740).

Letteralmente DSC sta per Dye-Sensitized Solar Cells ovvero celle solari sensibilizzate da un dye o colorante di natura chimico-organica. Chiamate anche celle di Grätzel in onore del loro ideatore, il Prof. Michael Grätzel dell'EPFL di Losanna, si ispirano ed emulano il principio di funzionamento dal processo di fotosintesi clorofilliana, dove, in modo analogo alle piante, pigmenti organici assorbono parte della radiazione solare e la convertono in energia elettrica (L. Dominici, D. Colonna, D. D'Ercole, G. Mincuzzi, R. Riccitelli, F. Michelotti, T. M. Brown, A. Reale and A. Di Carlo (2011) Dye Solar Cells: Basic and Photon Management Strategies; Solar Cells - Dye-Sensitized Devices, book edited by L. A. Kosyachenko, ISBN 978-953-307-735-2).

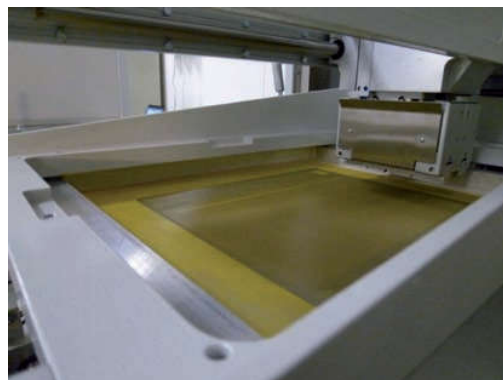
Elemento centrale della tecnologia fotovoltaica DSC è quindi un colorante o dye in forma liquida che è l'artefice della conversione in corrente elettrica della radiazione luminosa. La struttura elementare di una cella a colorante può essere immaginata come un "sandwich" di substrati di vetro o supporti flessibili resi elettricamente conduttivi, che vanno a costituire i due elettrodi della cella. Su uno dei due (il fotoanodo) viene depositato un film mesoporoso di Biossido di Titanio (TiO<sub>2</sub>) che ha il compito di fissare ed assorbire il colorante fotoattivo, sull'altro (il contro-elettrodo) un film nanometrico di platino che funge da catalizzatore e ha il compito di velocizzare la reazione di tipo Red-Ox che avviene nell'elettrolita. L'elettrolita ha il compito di rigenerare il colorante e riportarlo nel suo stato stazionario. Tutte le trasformazioni energetiche che avvengono all'interno del dispositivo sono di natura reversibile. Questo permette alla cella fotovoltaica di ripetere il fenomeno di fotogenerazione in modo ciclico. A differenza del silicio, in cui lo stesso materiale si occupa sia dell'assorbimento della radiazione solare, sia del trasporto di carica agli elettrodi, in queste celle i due processi sono distinti ed affidati rispettivamente al dye e al TiO<sub>2</sub>. La gamma di pigmenti che possono essere impiegati come elementi fotoattivi include sia estratti di origine naturale, come le antocianine derivate da molti frutti come il ribes, l'uva, l'arancia, la buccia della melanzana e i frutti di bosco, sia quelli sintetizzati chimicamente in laboratorio con lo scopo di massimizzare l'assorbimento dello spettro solare e di conseguenza l'efficienza di conversione energetica. Il TiO<sub>2</sub> è un semiconduttore che permette il passaggio della luce. Per migliorare il rendimento e per incrementare l'area attiva della superficie messa a disposizione del colorante, il film di TiO<sub>2</sub> viene sinterizzato ad una temperatura prossima ai 500°C al fine di creare una struttura nanometrica porosa e definire l'interconnessione elettrica tra le particelle che compongono il film (A. Di Carlo, A. Reale, T. M. Brown, F. Brunetti, (2010) La rivoluzione della plastica nel settore fotovoltaico; Centre for Hybrid and Organic Solar Energy (CHOSE), Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Roma, Italia).

## La sostenibilità del fotovoltaico organico: il processo produttivo utilizza temperature più basse di quelle per il silicio: si riduce il consumo di energia, si abbattano i costi e si riduce l'emissione di CO<sub>2</sub>

I processi di industrializzazione alla base della fabbricazione della tecnologia fotovoltaica organica, si basano sull'utilizzo di temperature più basse rispetto a quelle necessarie al processo realizzativo di celle solari in silicio, riducendo dunque sia il quantitativo di energia impiegata, sia l'emissione in ambiente di CO<sub>2</sub> legata alle lavorazioni richieste. Inoltre i procedimenti di realizzazione sono approssimabili a quelli utilizzati nell'industria della stampa dal momento che le fasi centrali della fabbricazione delle celle si basano sulla deposizione dei materiali utilizzati per tecnica serigrafica. La possibilità di contare su processi di realizzazione noti e a basso costo, consente di abbassare in maniera determinante i costi di produzione su scala industriale. I vetri così processati, divenuti superficie attiva, possono essere largamente impiegati in architettura, divenendo elementi utilizzabili sia per applicazioni BIPV, sia per il retrofit „Building-Applied Photovoltaics (BAPV) (B. P. Jelle, C. Breivik, (2012) The path to the building integrated photovoltaics of tomorrow, Energy Procedia).

In virtù della natura porosa intrinseca del dispositivo DSC, la tecnologia fotovoltaica organica presenta soprattutto la peculiarità unica di captare sia la luce diretta che la luce diffusa, rendendo possibile l'applicazione del pannello fotovoltaico senza un

vincolo indotto da una specifica inclinazione di installazione. A sostegno di ciò, è stato dimostrato che le celle fotovoltaiche organiche registrano due picchi di massimo rendimento, uno all'alba e l'altro all'imbrunire, funzionando quindi in maniera complementare alle tecnologie a base di silicio (C. Cornaro, S. Bartocci, D. Musella, C. Strati, A. Lanuti, S. Mastroianni, S. Penna, A. Guidobaldi, F. Giordano, E. Petrolati, T. M. Brown, A. Reale, A. Di Carlo, (2013) Comparative analysis of the outdoor performance of a dye solar cell mini-panel for building integrated photovoltaics applications; DOI: 10.1002/pip.2426). Questo evidenzia una produzione energetica quantificabile durante tutto l'arco della giornata e non solo circoscritto al momento di massima radiazione solare.



Questo fattore, non di poca importanza, fa sì che la tecnologia fotovoltaica DSC sia ideale per l'integrazione architettonica, non ponendo quindi limiti all'estro compositivo dei progettisti, ed eludendo potenziali vincoli dettati da specifiche inclinazioni ed orientamenti.

Il confronto della tecnologia organica con quelle convenzionali è stato oggetto di studio da parte del laboratorio ESTER (Energia Solare Test e Ricerca) dell'Università di Tor Vergata, attraverso l'utilizzo della stazione Meteosolare installata presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

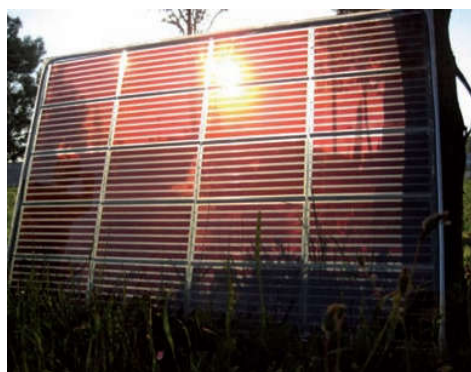
Dal punto di vista puramente estetico le DSC hanno l'aspetto di vetri colorati, elemento che le rende appetibili indistintamente dall'energia da esse prodotta. Il fattore colore associato ad un elemento di generazione energetica apre nuovi scenari di integrazione soprattutto se si pensa alla possibilità di realizzare facciate continue con tale tecnologia innovativa.

Attualmente la colorazione più sviluppata e prossima all'industrializzazione è il rosso (fig.3), presente nella versione opaca o semitrasparente (trasparenza > 25%). Aumentando l'opacità del dispositivo, aumenta la quantità di energia solare assorbita dalla cella, con un conseguente aumento di efficienza di conversione. I valori di rendimento utilizzati nella fase progettuale sono 3.20% per i moduli semitrasparenti anche se possono essere ottenuti valori di rendimento più alti con moduli opachi.

## Possibili applicazioni all'edilizia residenziale in uno studio in corso d'opera a cura di CHOSE (Polo Solare della regione Lazio)

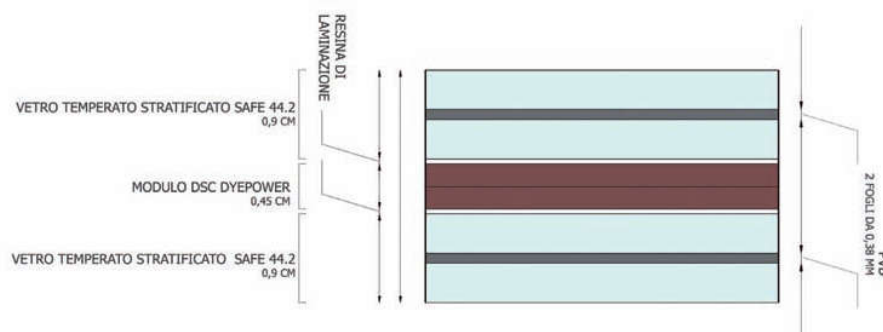
Quanto è stato descritto fino ad ora è oggetto di ricerca, dalla sua nascita, nel 2006, del Polo Solare della Regione Lazio CHOSE (Center for Hybrid and Organic Solar Energy) dell' Università di Roma Tor Vergata che all'interno del consorzio di ricerca Dyepower, sta portando avanti un progetto che ha come obiettivo lo studio dell'integrazione delle DSC in edilizia, passando dall'analisi di facciate continue e quello di elementi puntiformi da destinare ad applicazioni di edilizia residenziale (EArtuso, N.Barbero, C.Bignozzi, R. Boaretto, T.M.Brown, L.Bonandini, E.Busatto, S.Carli, D.Colonna, G.De Angelis, A.Di Carlo, F. Giordano, A.Guglielmotti, A.Guidobaldi, A.Lanuti, A.Lembo, S.Mastroianni, V.Mirruzzo, S.Penna, E.Petrolati, A. Reale, R. Riccietelli, G. Soscia, L. Vesce, G. Viscardi, (2013) Scaling Up of Dye Solar Cells for Building Integrated PhotoVoltaics (BIPV); 28th EU PVSEC, 30 September 2013 Paris).

In questo contesto, si è deciso di affrontare la progettazione di due differenti tipologie di parapetti fotovoltaici realiz-



zati integrando dispositivi fotovoltaici di tipo DSC e per ogni tipologia presentare due diversi modelli realizzati. La progettazione dell'elemento è stata vincolata alla scelta di un'architettura leggera, facilmente montabile e quindi altrettanto facilmente sostituibile, velocemente scollegabile senza che vengano compromesse le connessioni ed il cablaggio dell'intero impianto. La scelta di questa tipologia di integrazione ha in sé una serie di problematiche dovute alla natura stessa dei parapetti, quali oggetti verticali nati per garantire protezione a balconi, ballatoi e scale. Proprio la verticalità del parapetto ha fatto sì che nella progettazione di questo tipo, il fotovoltaico venga comunque orientato in modo pres-

soché verticale, con un angolo di massimo 10°. Un altro limite è sicuramente dovuto all'ombreggiamento indotto sia da elementi posti all'interno del balcone, come vasi, sia da elementi esterni all'edificio, come alberi, in grado di introdurre un abbassamento di rendimento e di produzione energetica da parte dell'impianto. Infine c'è da considerare che, come prescritto dalla normativa, i parapetti debbano avere una altezza di almeno 100 cm, al fine di tutelare la sicurezza dei fruitori delle balconate. Questo fa sì che la superficie impiegata per la realizzazione di un parapetto sia sensibilmente inferiore a quella che viene utilizzata per la realizzazione di una facciata o una tettoia, con un ammontare di energia prodotta nettamente più limitato. Nonostante queste difficoltà, la possibilità di progettare parapetti fotovoltaici realizzati con la tecnologia DSC presenta delle potenzialità intrinseche: la possibilità di non dover inclinare la superficie del parapetto, evitando di dover ricorrere ad un'inclinazione auspicabile ottimale, la facilità di montaggio e un semplice, ma efficace, abbellimento di carattere architettonico offerto dall'installazione. Cuore del progetto è rappresentato dai moduli fotovoltaici Dyepower nella loro dimensione standard, 30 cm x 20 cm, un "A4" fuori formato, che vengono assemblati e connessi tra loro al fine di ottenere un modulo architettonico (pannello) di diverse forme e dimensioni, in relazione alla tipologia di parapetto implementata (A. Di Carlo, (2013) Dye Solar Cell Technology on large Area; 9th Plastic Electronics Conference 2013, Dresden). Allo stesso modo è stata studiata e dimensionata una specifica struttura di sostegno che permetta di sostenere il peso dei pannelli, partendo dal peso del singolo elemento A4 che risulta pari a 0,67 kg. Contestualmente, la struttura di sostegno è stata progettata in maniera opportuna al fine di predisporre lo spazio necessario per il passaggio dei cavi e dei connettori per l'interconnessione elettrica dei parapetti. Inoltre, i profilati che definiscono il supporto del pannello DSC sono stati dimensionati opportunamente in relazione allo spessore dell'elemento fotovoltaico realizzato, valutando strutture analoghe disponibili sul mercato. La lastra di vetro che compone i 4 parapetti è conforme alle norme UNI vigenti in materia ed è così caratterizzata: 2 strati esterni da 8 mm ciascuno di vetro temprato 44.2 di sicurezza intervallati da 2 fogli di PVB da 0,38 mm e 2 strati di una resina trasparente sviluppata da Dyepower che permette di creare, attraverso un processo di laminazione a bassa temperatura, una struttura ad involucro che consente di rendere solidali i moduli DSC e i vetri di sicurezza. Lo spessore



complessivo della struttura laminata puo' raggiungere il valore di 2,35 cm.

Entrando nello specifico dei dispositivi sviluppati, si analizzano i 4 layout di parapetto proposti. I Modelli 1A – 1B sono caratterizzati da una struttura leggera, a sospensione, con il passaggio dei cavi studiato nel corrimano e disegnato ad hoc. L'ancoraggio, previsto rispettivamente a solaio e soletta, differenzia il design dell'oggetto architettonico nel numero di elementi A4 interconnessi insieme, 18 per il parapetto 1A e 12 per il modello 1B; nelle dimensioni 0,93m x 1,35m per il modello 1A; 0,95m x 1,02m per il modello 1B; e nel peso di 65,9 kg per il



modello 1A contro i 45,9 kg del modello 1B, rispettivamente.

I Modelli 2A – 2B non presentano il montante ed il passaggio dei cavi è stato studiato nel sistema di ancoraggio, rispettivamente a solaio e a soletta. Anche per questi 2 modelli la scelta dell'ancoraggio risulta il parametro progettuale condizionante per la scelta del numero di elementi A4, sia per le dimensioni, che per il peso dei parapetti. Nel modello 2A il numero di A4 è di 12 moduli; il peso è di 47,55 kg; le dimensioni sono pari a 0,60m x 1,42m. Nel modello 2B il numero di A4 è pari a 20 moduli; le dimensioni sono 1,2m x 1,17m ed il peso è di



70,8 kg.

Il rendimento dell'oggetto architettonico parapetto varia da 40 Watt ad 80 Watt proporzionalmente al numero di moduli Dyepower utilizzati, dal loro livello di trasparenza e dalla loro colorazione. Nella tabella si riportano le caratteristiche relative alle quattro tipologie di installazioni sviluppate.

La progettazione di parapetti fotovoltaici realizzati con tecnologia di ultima generazione di tipo organico è solo la prima tra le sperimentazioni di integrazione architettonica che ha in programma il consorzio Dyepower, come la realizzazione di strutture ombreggianti, facciate continue ed elementi di arredo urbano, al fine di rendere le città in cui viviamo degli spazi solari, piacevoli e colorati, e perseguire un'immagine positiva che meglio si addica ad uno mondo che rispetta e valorizza i suoi territori.

Maria Luigia Fiorentino - Università degli Studi di Roma, La Sapienza, Dipartimento Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura. Referente Scientifico per il Dipartimento PDTA: Prof. Fabrizio Tucci  
 Viviana Pascasi, Gennaro Cepparulo, Riccardo Riccitelli - Consorzio DyePower, Roma  
 Franco Giannini, Aldo Di Carlo - Consorzio DyePower, Roma; CHOSE (Center for Hybrid and Organic Solar Energy), Università di Roma Tor Vergata