

Alessandra Sanson^a, Massimo Mazzer^b^aCNR-ISTEC, Faenza (RA)^bCNR-IMEM, Parma

alessandra.sanson@istec.cnr.it

IL BIPV PER LA TRANSIZIONE ENERGETICA

L'energia elettrica da fonti rinnovabili è determinante per raggiungere gli obiettivi necessari a contenere il riscaldamento globale e i conseguenti cambiamenti climatici. Con le attuali tecnologie fotovoltaiche si può trasformare qualsiasi edificio in produttore netto di energia, aprendo la strada alla generazione diffusa e allo sviluppo delle Comunità Energetiche.

Più del 70% delle emissioni globali di CO₂ nell'atmosfera è attualmente dovuto alla produzione e all'uso di energia. Secondo l'Agenzia internazionale per le energie rinnovabili (IRENA), è necessario azzerare queste emissioni entro il 2050, per limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5 °C, come previsto dagli obiettivi dell'Accordo di Parigi. Questo richiederà un massiccio ricorso all'energia elettrica e alle fonti rinnovabili anche per applicazioni finora basate sull'utilizzo di energia termica prodotta, per la maggior parte, da combustibili fossili, come i motori a combustione interna o le caldaie per il riscaldamento degli edifici.

La generazione di energia elettrica dovrebbe quindi triplicare, e raggiungere i 70.800 TWh/a entro il 2050, con un contributo di almeno il 90% dalle fonti rinnovabili, la maggior parte del quale da fotovoltaico [1].

L'attuale mancanza di una previsione attendibile sullo sviluppo del settore dell'idrogeno verde, che è ancora nella fase di R&D e dei primissimi progetti pilota, rende, inoltre, questa stima conservativa.

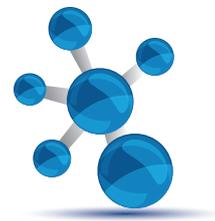
Quello che è certo è che gli edifici residenziali, commerciali e pubblici e le piccole utenze artigianali o industriali a bassa intensità energetica, costituiscono ben più della metà della domanda di energia primaria nei Paesi maggiormente industrializzati. Per la gran parte di queste utenze la domanda annua di energia è confrontabile, se non inferiore, all'energia elettrica generabile annualmente in quella frazione di superficie, da esse occupata, che è adatta all'installazione di impianti fotovoltaici.

In un recente documento [2] redatto da un gruppo di esperti italiani di R&I nel settore fotovoltaico nell'ambito del progetto Europeo "PV IMPACT", si evidenzia come con le attuali tecnologie fotovoltaiche sia sufficiente il 5% della superficie nazionale ricoperta da edifici, per generare circa 1/3 dell'energia elettrica attualmente consumata in Italia. Nello stesso documento si propone di realizzare un catasto solare nazionale per individuare con precisione i siti adatti ad ospitare impianti fotovoltaici, valutarne la potenziale produttività energetica, l'impatto ambientale e visivo, correlando le caratteristiche di ogni sito alle tecnologie fotovoltaiche ad esso più adatte.

Le novità introdotte dalle recenti normative sulle Comunità Energetiche in ambito nazionale ed europeo, combinate con i costi competitivi del fotovoltaico rispetto alle altre fonti di energia elettrica, rendono più concreta l'evoluzione della rete di distribuzione di energia elettrica verso una tipologia che favorisca la generazione diffusa e una maggiore resilienza.

In questo quadro il fotovoltaico integrato negli edifici gioca un ruolo fondamentale non solo perché costituisce una soluzione sostenibile dal punto di vista economico, ma anche perché è in grado di offrire un vasto range di soluzioni diversificate in termini di caratteristiche strutturali, funzionali ed estetiche adatte sia all'utilizzo in edifici di nuova costruzione che, soprattutto, nella ristrutturazione di edifici esistenti.

La discriminante principale a favore del fotovoltaico integrato, è diventata la produttività energetica annua per unità di superficie che è già oggi ade-



guata a soddisfare il consumo energetico di un tipico edificio di fascia energetica medio-alta ed è destinata a crescere rapidamente nei prossimi 5-10 anni.

Questo vale non solo per le coperture ma anche per le facciate. La resa media annua di un impianto fotovoltaico di fascia alta, installato su una facciata verticale di orientazione compresa fra sud-est e sud-ovest, in tre località diverse al nord, al centro e al sud Italia, è oggi pari a circa 180 kWh/m². Considerando che tutti i principali produttori di celle e moduli fotovoltaici prevedono di raggiungere il 30% di efficienza entro il 2030, questo valore è destinato a raggiungere i 250 kWh/m². Queste cifre suggeriscono che, nel prossimo futuro, anche i condomini potranno diventare produttori netti di energia e inserirsi, come *prosumers*, nel nuovo mercato che nascerà attorno alle Comunità Energetiche. Con il 40% del totale di energia consumata, quello edilizio rappresenta da sempre uno dei settori chiave per la transizione verso un sistema energetico decarbonizzato fondato sulle rinnovabili.

Oltre a incrementarne l'efficienza in termini di dissipazione termica ed elettrica, l'edificio si pone come elemento attivamente partecipante al sistema energetico locale secondo la generalmente accettata definizione di Energy Positive Building (EPB). In questa accezione, è nucleo primario del sistema energetico locale: non solo non consuma energia ma ne produce in eccesso diventando così l'unità fondamentale per le comunità energetiche. L'utilizzo di dispositivi di conversione fotovoltaica nell'edificio consente, oltre a generare elettricità da fonti non fossili, quindi di diminuire l'inquinamento dei centri abitati, di incrementare la luce naturale all'interno dell'edificio, sostituendo facciate opache con un risparmio tra il 50 e l'80% di utilizzo di luce artificiale, 11% di consumi per il raffrescamento e fino al 13% di consumo di elettricità soprattutto negli edifici [3]. Il fotovoltaico gioca un ruolo di primaria importanza per la realizzazione di un EPB per la sua versatilità e adattabilità sia in termini di potenza installata/installabile che di compatibilità con le diverse tipologie architettoniche presenti. Se, infatti, edifici di nuova concezione prevedono in fase di progettazione l'impianto fotovoltaico e quindi massimizzano la produzione energetica, nel

caso di ristrutturazioni di edifici esistenti, specie se di interesse artistico-culturale, fondamentale è la necessità di soluzioni che non ne alterino i tratti fondamentali, ponendo quindi importanti sfide tecnologiche.

Nonostante l'indubbia complessità, il BiPV può svolgere un ruolo fondamentale non solo per la transizione energetica del sistema nazionale, ma anche per costruire una filiera italiana integrata di sviluppo e crescita. Un efficace sviluppo di questi prodotti, infatti, necessita di una stretta collaborazione tra chi sviluppa tecnologie fotovoltaiche e chi sviluppa gli edifici: ingegneri, architetti ma anche i responsabili dei processi di posa. Con il notevole patrimonio di eccellenze legate al design, ai materiali per le costruzioni, all'ingegneria e all'architettura, l'Italia presenta il background ideale per lo sviluppo di prodotti integrati in grado di contribuire efficacemente alla ripresa dell'intero comparto edilizio e alla sua parziale riconversione verso prodotti ad alto valore aggiunto all'insegna del *made in Italy*.

A differenza degli altri ambiti applicativi dove il focus è essenzialmente legato all'efficienza, nel BiPV è necessario considerare fattori tra cui: il peso, la semitrasparenza e la adattabilità a diverse condizioni di posa e di luminosità nonché alla necessità di integrare cablaggi, inverter, ecc. con gli altri impianti dell'edificio. È anche importante notare come il settore edilizio sia caratterizzato da una forte variabilità di condizioni climatiche sia in termini di temperatura, che di irraggiamento e di tipologia di abitato. Di conseguenza, la scelta della tecnologia più adatta è fortemente legata al contesto in cui deve essere integrata e non può essere rigidamente standard. La variabilità di irraggiamento, in particolare, non è legata solo ai cambiamenti atmosferici (nuvolosità) ma anche alla presenza di edifici adiacenti che, quindi, possono adombrare ciclicamente le celle durante la giornata. Per questo motivo, non solo il BiPV deve prevedere soluzioni di generazione integrabili *ad hoc*, ma le stesse tecnologie adottate devono tener particolarmente in considerazione situazioni di irraggiamento diffuso e non diretto. In Fig. 1 vengono riportati tutti i possibili criteri che influiscono sulla scelta della tecnologia di integrazione più adatta.

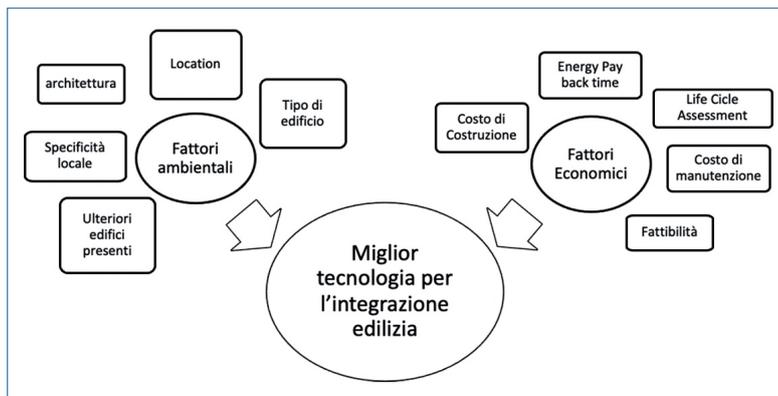


Fig. 1 - Principali fattori che influenzano la scelta di una tecnologia fotovoltaica per il BiPV

Il fotovoltaico per edifici viene comunemente classificato in:

- Building applied PV (BAPV), dove la cella fotovoltaica è applicata sopra elementi architettonici pre-esistenti;
- Building integrated PV (BiPV), dove la funzionalità fotovoltaica viene integrata completamente in elementi architettonici che vanno a sostituire i corrispondenti elementi passivi.

In quest'ultimo caso, l'elemento architettonico viene re-ingegnerizzato per integrare gli strati di materiali necessari a cattura e conversione della radiazione solare in elettricità. Inoltre, qualsiasi eventuale danneggiamento o malfunzionamento porta all'esposizione diretta dell'interno dell'edificio, quindi complicando anche i processi di manutenzione/sostituzione. Dal primo esempio di BiPV (1982, ad opera di Thomas Herzog) innumerevoli sono state le applicazioni di fotovoltaico negli edifici, tanto che nell'ottobre 2016 è stata introdotta la norma standard EN50583 specificatamente dedicata a "Photovoltaics in Building", che include le linee guida sulla base delle quali progettare, produrre e installare moduli BiPV nelle diverse possibili posizioni dell'edificio [4].

L'integrazione può avvenire su superfici opache (quindi pareti esterne perimetrali, tetti, alette frangisole, ma anche elementi flessibili come tende) che trasparenti (vetrate) dove, oltre a fornire la funzionalità fotovoltaica, la cella aiuta a gestire l'irraggiamento interno.

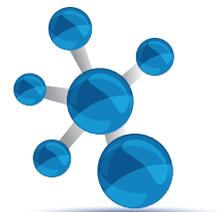
Nel caso di superfici trasparenti come le vetrate, l'integrazione può avvenire su vetro singolo oppure

su doppi vetri sfruttando, in questo caso, la camera interna con notevoli vantaggi dal punto di vista del bilanciamento termico del componente [5].

Se il BAPV è stato il primo esempio di funzionalità fotovoltaica integrata con uso quasi esclusivo della prima generazione di celle solari fotovoltaiche (silicio monocristallino e policristallino), nel BiPV sono state progressivamente introdotte anche le altre tecnologie: dal film sottile alle celle a colorante, fino alle più recenti perovskiti. La lunga durata e la maturità tecnologica, fanno delle celle al silicio la tecnologia a

tutt'oggi più applicata anche in ambito edilizio, con un mercato che, si stima, raggiungerà nel 2022 i 163 milioni di dollari, con un incremento di oltre l'11% rispetto al 2016. Le celle monocristalline vengono prodotte per processo Czochralski da cristallo singolo mentre quelle policristalline per solidificazione di silicio fuso. Entrambi i processi risultano essere energivori e con un discreto impatto ambientale, sebbene il progressivo miglioramento abbia in parte contribuito a diminuire considerevolmente quest'ultimo [6].

La seconda generazione comprende il silicio amorfo, il cadmio tellururo (CdTe), il rame indio solfuro (CIS) e il rame indio gallio seleniuro solfuro (Cu(In,Ga)₂Se₂, CIGS). Queste tecnologie risultano avere minori costi di produzione grazie a processi più economici legati alla deposizione di film (per via chimica, come la serigrafia, o fisica come lo sputtering). CdTe, CIS e CIGS sono inoltre semiconduttori diretti e quindi in grado di assorbire lo spettro solare più efficacemente del silicio (semiconduttore indiretto) perciò lo spessore attivo di materiale è generalmente dell'ordine di pochi micron rispetto ai 150 µm attualmente considerati per il silicio mono e policristallino. Tuttavia, queste celle sono particolarmente sensibili all'umidità, che ne degrada pesantemente le prestazioni nel lungo periodo. La presenza di cadmio (metallo pesante tossico per l'uomo e per l'ambiente) anche se molto ridotta (le celle CdTe ne contengono meno di 7g/m²) incide sulla sostenibilità ambientale della tecnologia (soprattutto in fase di produzione e dismissione) mentre indio e gallio (terre rare ampiamente utilizzate anche in altri settori) sono con-



siderate materie prime critiche e quindi attenzionate per la scarsa reperibilità e la necessità di recupero e riciclo. Attualmente le tecnologie di seconda generazione coprono circa il 15% del mercato globale del building integration con una crescita annua media di più del 12% nel 2018 [3].

Sia le celle di prima che di seconda generazione in singola giunzione possono sfruttare solo il 31% dello spettro solare (Limite di Shockley-Queisser) mentre il resto dell'energia viene persa sotto forma di calore. Inoltre, sono generalmente caratterizzate da colorazione dal blu scuro (silicio) al nero (film sottile) che le rendono particolarmente adatte per elementi opachi. Per il silicio cristallino, l'introduzione di rivestimenti anti riflesso sul vetro di protezione frontale, utilizzati per diminuire la normale alta riflettività dei sistemi, viene sfruttata per impartire diverse colorazioni a scapito però dell'efficienza, che diminuisce a causa dello spessore necessario a modificare la colorazione della cella. Il film sottile, d'altra parte, per l'intrinseco basso spessore, si presta all'integrazione in sistemi se-

mitrasparenti (come vetrate) dove l'introduzione di specifici patterns, strati colorati sulla superficie del vetro di protezione superiore/inferiore o come incapsulanti, favorisce la variabilità cromatica [7, 8]. Il funzionamento delle Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) non è legato all'effetto fotovoltaico ma a conversioni fotoelettrochimiche assimilabili a quanto avviene nel processo di sintesi clorofilliana. Così come nelle foglie la clorofilla assorbe la luce solare convertendola in nutrienti utili per le piante, così in una DSSC un colorante opportuno viene assorbito su uno strato mesoporoso di un semiconduttore (generalmente TiO_2) ed assorbe la radiazione luminosa; il sistema è completato da un elettrolita contenente una coppia redox e un controlettrodo generalmente di platino depositato su vetro conduttore (Fig. 2a). Nonostante le efficienze del sistema non siano paragonabili a quelle delle tecnologie viste in precedenza (attualmente al 13% [9]) e la stabilità risulti tutt'ora da migliorare, i bassi costi di produzione (legati all'utilizzo di materiali economici e non critici (platino a parte che comunque viene recentemente sostituito con materiali alternativi come il grafene) e di processi industriali semplici come la serigrafia) uniti ad un'estrema flessibilità in termini di design e di pattern realizzabili (Fig. 2b), rendono questa tecnologia particolarmente adatta all'integrazione architettonica sia in elementi rigidi che flessibili.

Le celle a perovskite, che traggono origine dalle precedenti, sono tra le tecnologie più promettenti attualmente esaminate. Questi componenti di formula generale ABX_3 , dove A è un catione organico (generalmente metilammonio), B generalmente piombo e X un alogeno, sono generalmente posti tra due strati, uno conduttore di elettroni (Electron Transporting Layer, ETL) depositato su un vetro conduttore e un trasportatore di lacune (Hole Transporting Layer, HTL). La tecnologia ha conosciuto una veloce diffusione a causa del rapido incremento di efficienza registrato dalla sua prima applicazione, passata in poco meno di 10 anni da circa 12% (2013) a 25,5% (2021). Nonostante i dubbi sollevati dall'utilizzo del piombo e con ancora alcuni problemi di stabilità da risolvere essenzialmente legati alla esposizione ad umidità e ossigeno, la tecnologia è sicuramente tra le più investigate an-

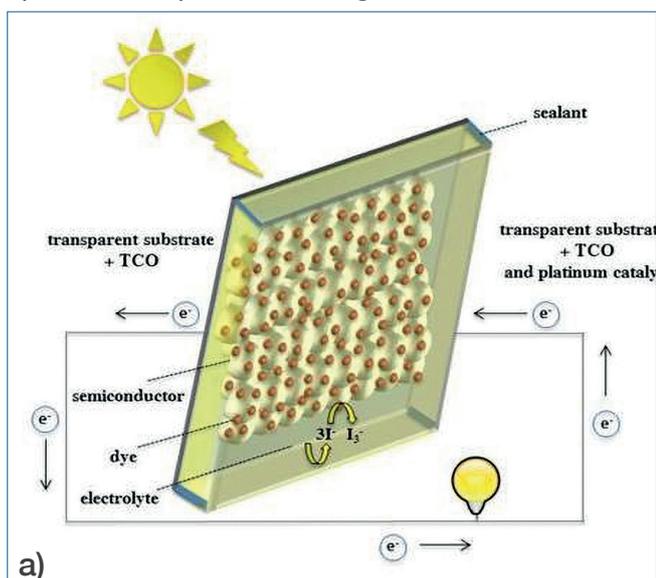
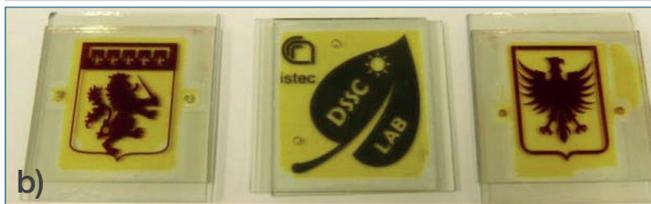


Fig. 2 - a) Schema di funzionamento e b) esempi di flessibilità di design di una cella sensibilizzata a colorante (DSSC)



che per applicazioni BiPV, dove la semitrasparenza e la differente colorazione può essere raggiunta diminuendo lo spessore dell'assorbitore perovskitico o tramite l'utilizzo di strati addizionali colorati in piena analogia con quanto visto per la seconda generazione di celle.

Anche le celle solari organiche (OPV) rappresentano una valida opzione per il BiPV. In queste celle la conversione è dovuta alla presenza di elettroni π che hanno la possibilità di muoversi lungo estesi sistemi coniugati tipici dei semiconduttori organici

che possono essere prodotti economicamente e con spessori molto modesti.

Infine, concentratori solari luminescenti (formati da uno strato polimerico dopato con particelle luminescenti) offrono svariate possibilità cromatiche e di trasparenza in vetrate mentre nuovi composti come le kesteriti (Cu_2ZnSnS_4) rappresentano le nuove frontiere del BiPV che, sebbene ancora in fase di sviluppo, mostrano incoraggianti dati di efficienza con materiali non tossici e abbondanti in natura.

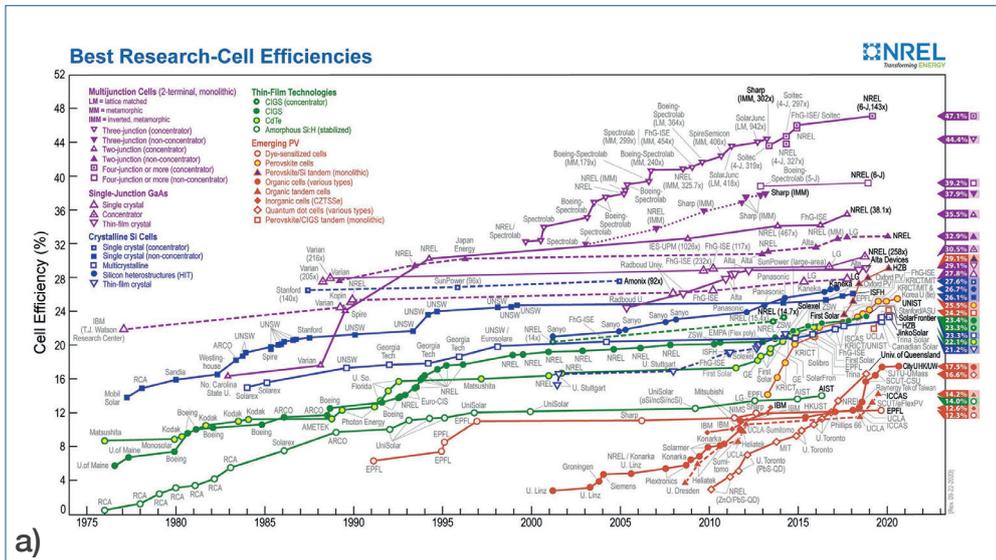
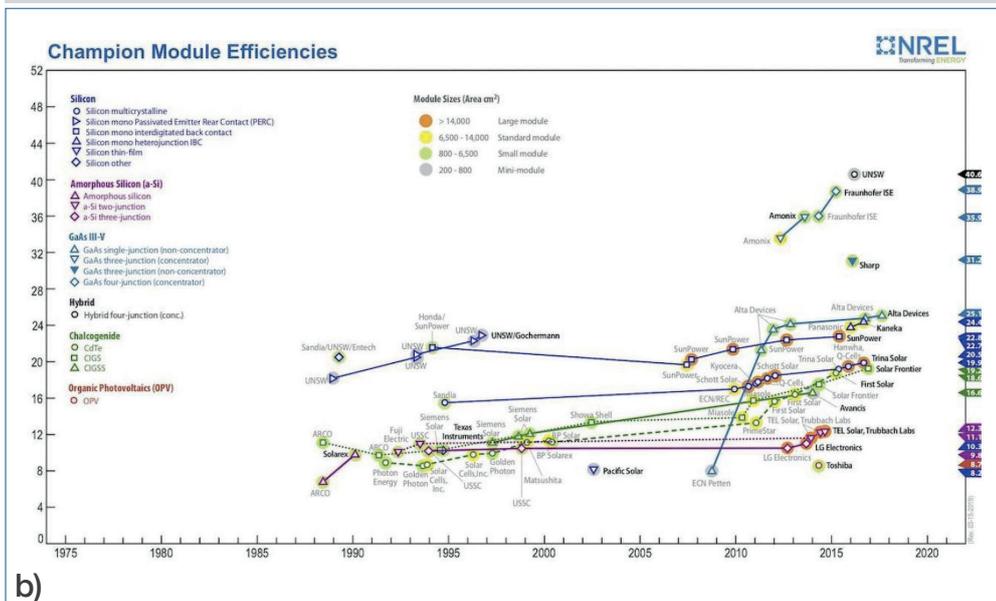
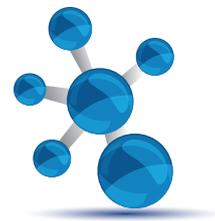


Fig. 3 - Efficienze delle tecnologie fotovoltaiche sviluppate a) su scala di laboratorio [9] e b) sotto forma di modulo



Le efficienze relative alle diverse tecnologie sono riportate in Fig. 3 [9] sia in termini di celle (a) che di moduli (b). Sono considerati qui anche sistemi a più giunzioni (cioè più celle accoppiate a dare assorbimenti in diverse zone spettrali con aumenti notevoli di efficienza) anche se questo approccio non è al momento considerato nel BiPV per l'ulteriore aumento di complessità ad essi connesso.

Come già messo in evidenza è particolarmente importante per il BiPV avere un ampio range di tecnologie disponibili per scegliere quella più adatta al particolare edificio considerato. L'efficienza, sebbene importante, non è parametro unico a guidare la scelta soprattutto in situazioni di retro-fitting, anche se il BiPV può contribuire significativamente alla produzione nazionale di energia elettrica. La situazione europea (e italiana in particolare)



risente più di altre di questa necessità, con un patrimonio costruito che, per più del 35%, è più vecchio di 50 anni, il 75% dichiarato energeticamente inefficiente [4], e un'ampia presenza di edifici storico-artistici in cui l'efficientamento energetico deve rigorosamente rispettare le specificità architettoniche presenti.

La transizione ecologica in Italia stenta ancora a decollare e lo stesso Piano di Ripresa e Resilienza valuta insufficiente l'attuale tasso di crescita delle rinnovabili, in particolare eolico e fotovoltaico, che è circa un ordine di grandezza inferiore a quanto sarebbe necessario per raggiungere gli obiettivi del Piano Nazionale Integrato Energia e Clima che, peraltro, dovranno essere presto rivisti al rialzo per essere adeguati ai più recenti macro-obiettivi del Green Deal Europeo.

A differenza del problema delle autorizzazioni alla costruzione di nuovi impianti fotovoltaici ed eolici a terra, che investe anche la questione non secondaria del consumo di suolo, le barriere che frenano tuttora lo sviluppo del fotovoltaico integrato nell'ambiente costruito sono soprattutto legate alla mancanza di una vera e propria catena del valore che colleghi i produttori di moduli o semilavorati fotovoltaici al settore edilizio, in particolare al settore delle ristrutturazioni edilizie, previsto in forte espansione nei prossimi 10 anni. Se le tecnologie fotovoltaiche hanno fatto notevoli progressi in termini di efficienza, multifunzionalità ed affidabilità, mancano ancora dei prodotti e dei sistemi di integrazione semi-standard, adeguati ad un ampio spettro di progetti di ristrutturazione edilizia e utilizzabili anche da imprese che non abbiano una specifica competenza di installatori fotovoltaici.

Più che un limite, questa considerazione evidenzia un'opportunità per le imprese Italiane in un settore, quello del BiPV, in cui non vi è diretta competizione con le grandi multinazionali produttrici di celle e moduli fotovoltaici destinati soprattutto ai grandi impianti a terra. L'eterogeneità dei progetti di ristrutturazione edilizia è tale da rendere pressoché impossibile l'adozione di un prodotto fotovoltaico standard, realizzabile in grandi volumi, privilegiando invece la flessibilità e la creatività. Allo stesso tempo, il comparto richiede una stretta connessione con il mondo della ricerca, impegnato non solo

ad individuare materiali più efficienti, con minore quantità di elementi critici o dannosi e nell'ottimizzare i processi di produzione delle singole celle e dei moduli, ma anche nell'integrazione sempre più spinta della funzionalità fotovoltaica in elementi rigidi e flessibili che possano fornire nuove e interessanti soluzioni architettoniche per mettere a disposizione del settore delle costruzioni un numero sempre maggiore e diversificato di prodotti che si adattino alle diverse situazioni possibili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Mazzer, D. Moser, 2021, Nature Italy, <https://www.nature.com/articles/d43978-021-00049-y>
- [2] "A Strategic Plan for Research and Innovation to Relaunch the Italian Photovoltaic Sector and Contribute to the Targets of the National Energy and Climate Plan", Progetto Europe PV IMPACT: <https://pvimpact.eu/news-resources/reports/>
- [3] A. Ghosh, *J. Cleaner Product.*, 2020, **276**, 123343.
- [4] E. Saretta, P. Caputo, F. Frontini, *Sustainable Cities and Society*, 2019, **44**, 343.
- [5] G. Yu *et al.*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, **149**, 111355.
- [6] J. Antonanzas, J.C. Quinn, *J. Cleaner Product.*, 2021, **311**, 127791.
- [7] L. Stamenic, C. Erban, *Thermal Science*, 2021, **25**(2), Part B, 1523.
- [8] A. Scognamiglio, *Sustainability*, 2021, **13**, 5500.
- [9] NREL Best Research-Cell Efficiency Chart. Available online <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

BiPV in Energy Transition

Electricity from renewable sources is crucial to achieving the goals necessary to contain global warming and the resulting climate change. With current photovoltaic technologies, any building can be transformed into a net energy producer, paving the way for widespread generation and development of Energy Communities.