

Il fotovoltaico fra scenari tecnologici e strategie per la competitività della filiera

In numerosi scenari prospettici il fotovoltaico occupa un ruolo primario nel mix di approvvigionamento energetico. Tuttavia, per rafforzare la competitività della filiera in Europa ed in Italia sono necessarie nuove strategie per ridurre i costi e accrescere l'efficienza di conversione con un ruolo cruciale per ricerca, innovazione e sviluppo, anche attraverso la digitalizzazione e l'utilizzo di tecniche di Machine Learning. L'ENEA è pienamente inserita in questa sfida con attività e progetti a livello nazionale e internazionale.

DOI 10.12910/EAI2020-038

di **Ezio Terzini, Paola Delli Veneri, Girolamo Di Francia, Mario Tucci**, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili, ENEA (*)

Sono molti gli scenari energetici che assegnano al fotovoltaico (PV) un ruolo primario nel mix di approvvigionamento energetico del prossimo futuro [1,2,3].

Mercato globale e prospettive in Italia

Ma, oltre gli scenari, i dati reali di mercato ci dicono che nel 2019, a livello mondiale, le installazioni fotovoltaiche hanno raggiunto una potenza cumulata superiore ai 600 GW (627 GW) [4], con un installato annuale di circa 114,9 GW, segnando + 12% rispetto ai 102,2 GW del 2018. La Cina resta il Paese leader per potenza installata annua e guida la classifica con il 26% del mercato globale, con i suoi 30,1 GW installati nel 2019, seguita dall'insieme dei Paesi EU con 16 GW, dagli Stati Uniti con 13,3 GW e poi dall'India che ha installato 9,9 GW sottolineando la vivacità del mercato.

Nel 2019, in Italia, dopo una media praticamente costante di circa 400 MW/anno negli ultimi 4-5 anni, le

installazioni sono cresciute di circa il doppio, con 757 MW totali installati. La potenza cumulata installata nel nostro Paese ha pertanto raggiunto 20,86 GW [5], un risultato che testimonia una rinnovata fiducia negli investimenti su questa fonte rinnovabile che ha ripreso vigore anche dal quadro di indirizzo politico.

Di fatto, il Piano Nazionale Integra-

to per l'Energia e il Clima (PNIEC) ha segnato l'inizio di un importante cambiamento nella politica energetica e ambientale italiana verso la decarbonizzazione, incorporando misure e investimenti per il Green New Deal italiano. Al fotovoltaico, il PNIEC assegna un obiettivo di crescita ambizioso di 51,12 GW di potenza installata al 2030 con una generazione

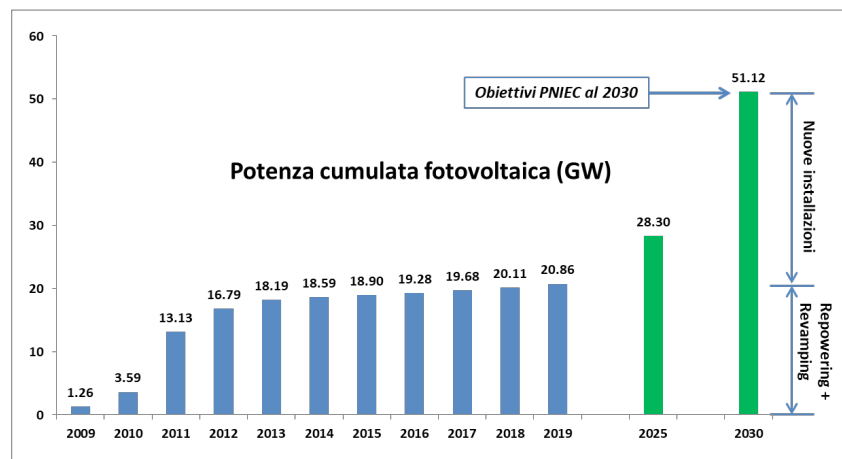


Fig. 1 Potenza fotovoltaica installata in Italia al 2019 e obiettivi PNIEC al 2025 e 2030



Fig. 2 Laboratorio ENEA nel Centro Ricerche Portici per la ricerca sulle celle a base di perovskite

di energia di 73 TWh, circa tre volte quella corrente: in sintesi, 30 GW di nuove installazioni, ma con la concomitante necessità di preservare la potenza già in campo (repowering + revamping) (Figura 1). Buona parte degli strumenti per vincere questa sfida risiedono nell'avanzamento tecnologico delle celle, dei moduli e della gestione degli impianti che mirano costantemente alla riduzione dei costi, all'aumento dell'efficienza di conversione e alla pervasiva digitalizzazione, strada ormai obbligata per l'ottimizzazione fine della produttività, del trading, dell'integrazione a rete e per la smartizzazione delle operazioni di Operation & Maintenance (O&M), utili al mantenimento del patrimonio di installato progressivo.

Le attività di ricerca ENEA per il fotovoltaico

La ricerca di settore in ENEA è allineata con i maggiori laboratori internazionali e si focalizza su alcune delle più promettenti tecnologie oggi investigate. In particolare, si punta al miglioramento dell'efficienza, a basso costo, della tecnologia dominante del silicio cristallino (c-Si) [6,7], sviluppando celle ad eterogiunzioni. Questa tecnologia, basata sulla realizzazione di giunzioni

tra silicio cristallino e silicio amorfo 'drogato'¹ (HJT-Heterojunction Technology), consente di ottenere sia celle convenzionali mantenendo un'alta efficienza di conversione a bassi costi, sia celle bifacciali applicando una griglia metallica ed un contatto trasparente (TCO-trasparent conductive Oxide) nella parte posteriore della cella, in modo da consentire l'assorbimento della luce da entrambi i lati. Un'altra architettura di cella HJT molto studiata è quella nella quale la raccolta di entrambi i portatori avviene

nella parte posteriore del dispositivo (IBC-interdigitated back contact solar cells): in tal modo si può ottenere dal dispositivo una corrente maggiore grazie all'assenza degli effetti di ombreggiamento ad opera della griglia metallica.

I laboratori dell'ENEA sono impegnati nello sviluppo di celle solari ad eterogiunzione di silicio e, in particolare, nello sviluppo di film nanocristallini di ossido di silicio intrinseco o 'drogato' di tipo n e di tipo p e, come contatti selettivi, materiali quali ad esempio MoOx, NiOx, TiOx, WOx, LiF ecc. che vengono anche definiti contatti 'dopant free', in grado di evitare l'uso di gas tossici, quali PH₃ o B₂H₆, per il drogaggio dei film di silicio.

Sono anche in fase di sviluppo tecniche di testurizzazione dei wafer di silicio mediante processi di attacco chimico o fisico. Gli studi e i progressi tecnologici sui dispositivi HJT sono di grande interesse per l'industria fotovoltaica nazionale che, con lo stabilimento 3SUN, di Enel Green Power a Catania, costituisce una delle maggiori realtà di PV manufacturing d'Europa. La fabbricazione in 3SUN è, appunto, basata sulla tecnologia HJT in configurazione bi-

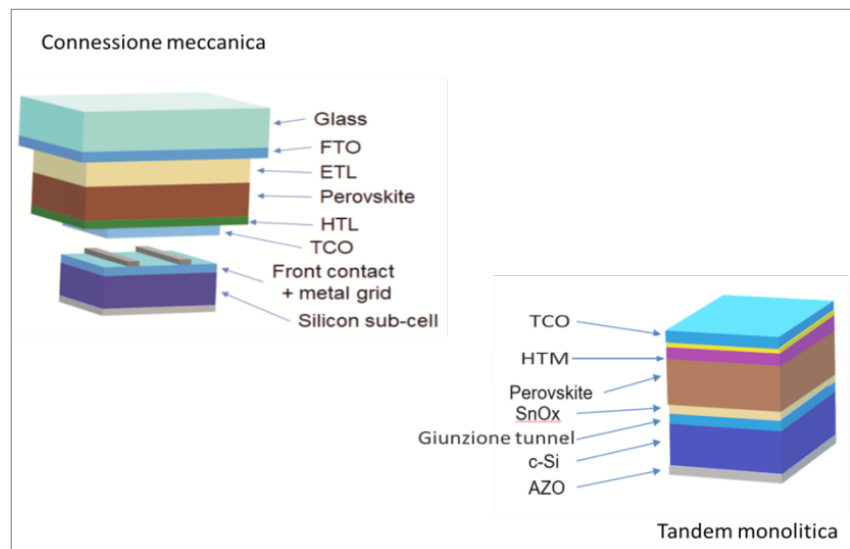


Fig. 3 Strutture tandem perovskite/cSi monolitica e ad accoppiamento meccanico



Fig. 4 GAIA energy: Polo Logistico Alimentare Gricignano d'Aversa

facciale, con una capacità produttiva massima di circa 200 MW all'anno. I moduli hanno potenze fino a 400 W e un'efficienza superiore al 20,5%, con un fattore bifacciale molto elevato (> 90%). Questi risultati consentiranno di ottenere valori di LCOE più bassi grazie alla generazione di energia aggiuntiva rispetto alle tecnologie tradizionali e anche grazie all'ottima stabilità termica.

Perovskite e kesterite: verso celle solari ad alta efficienza

Un significativo impegno è posto anche sullo sviluppo di dispositivi

a multigiunzione che combinano le proprietà di vari materiali assorbitori per 'specializzare' ogni cella della struttura all'assorbimento di parti specifiche dello spettro solare, al fine di superare i valori di efficienza correnti [8], ma anche i limiti teorici delle celle al silicio [9]. Nell'ottica dei dispositivi multigiunzione, i laboratori dell'ENEA (Figura 2) sono impegnati nello sviluppo di materiali a base di minerali quali perovskiti e kesteriti come possibili strati attivi ad alta gap, idonei cioè ad assorbire la parte di spettro solare a più alta energia, che offrono potenziali vantaggi in termini di costi e disponibilità rispetto ad altre opzioni. **Tra i candidati più promettenti c'è proprio la perovskite, grazie alle alte prestazioni già dimostrate dalle celle a singola giunzione** (efficienza record in laboratorio di circa il 25% su piccola area). Le perovskiti sono materiali descritti dalla formula ABX_3 , dove X è un anione, mentre A e B sono cationi di differenti dimensio-

ni. Le celle più performanti vengono ottenute utilizzando un mix di cationi per il componente A, quali ad esempio metilammonio (MA+), formamidinio (FA+), Cesio (Cs+) e un mix di anioni quali iodio (I-), bromo (Br-) e cloro (Cl-), mentre al momento il piombo è utilizzato per il componente B. Insieme allo studio sul materiale assorbitore e alle differenti tecniche e composizioni per realizzarlo (crescita da soluzioni o mediante processi di evaporazione), la ricerca è focalizzata poi sullo sviluppo di strati trasportatori di elettroni (ETL) e lacune (HTL) che siano efficaci per le differenti architetture di dispositivo studiate.

Lo sviluppo di film sottili policristallini di kesterite (CZTS) ha l'obiettivo di superare il problema della scarsa disponibilità di indio contenuto nei moduli in CIGS (Copper Indium-Gallium Selenide). Il CZTS ha la stessa struttura cristallografica del CIS (Cu-InSe₂) con la differenza che l'indio è sostituito dalla coppia zinco-stagno ed

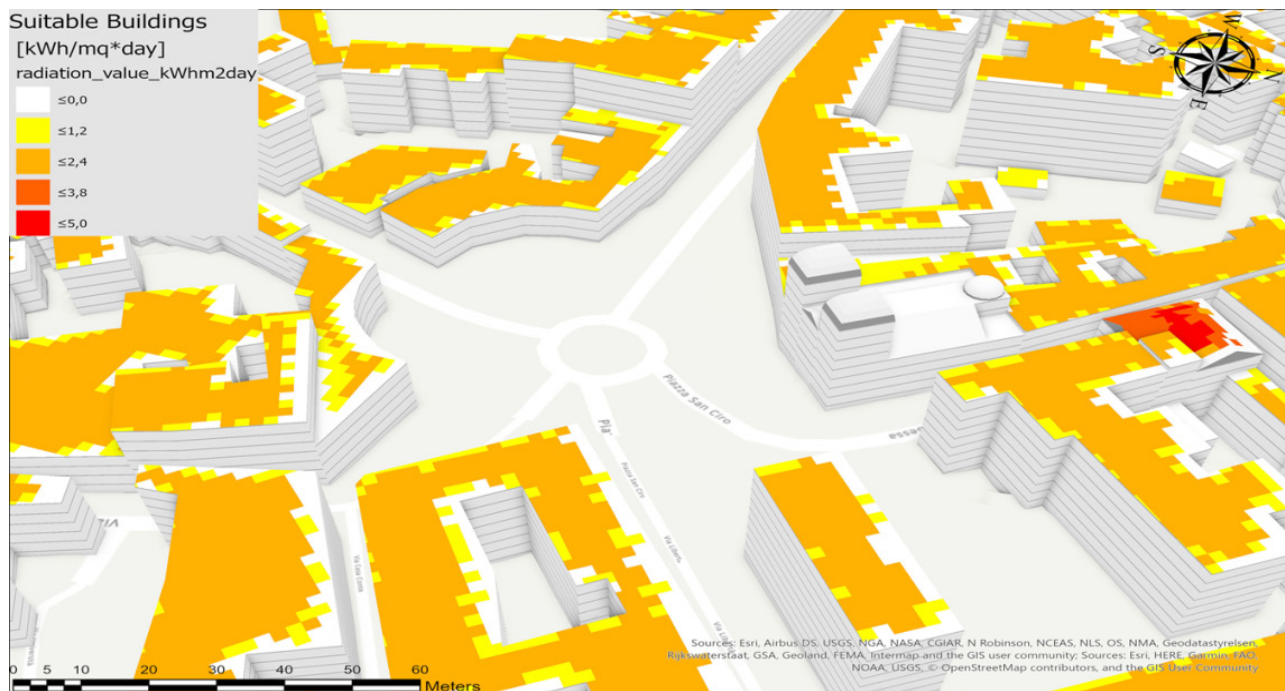


Fig. 5 La mappa relativa alla piazza S. Ciro di Portici, riporta la resa energetica in kWh/mq·day e tiene conto, oltre che della struttura reale dei tetti, anche di una molteplicità di possibili ulteriori effetti tra cui: ombreggiatura reciproca degli edifici, possibili effetti derivanti dalla vegetazione, presenza di aree non effettivamente utilizzabili ecc. Il metodo è estendibile anche alle facciate degli edifici stessi

Tab.1 Nella tabella è riportato il risultato della valutazione di 5 tecniche di ML (Isolation Forest (IF), one-Class Support Vector Machines, Local Outlier Factors, Deep Learning Autoencoders e Gaussian Mixtures Models (GMM)) nella loro capacità di consentire la rilevazione anomalie degli impianti PV. Il confronto nelle prestazioni è normalizzato ed è ottenuto attraverso l'applicazione di 5 diverse metriche usualmente utilizzate a questo scopo: balanced accuracy, recall, F1, Matthews Correlation Coefficient e Cohen Kappa [12]

Model	Metric				
	Acc _{balanced}	F1	recall	MCC	Cohen Kappa
IF	0,929	0,013	0,077	0,031	0,032
oneSVM	0,907	0,231	0,542	-0,125	-0,079
LOF	0,959	0,397	1,000	0,203	0,008
Autoencoder	0,948	0,538	0,176	0,859	0,619
GMM	1,000	1,000	0,683	1,000	1,000

il selenio è sostituito dallo zolfo. I film policristallini di CZTS sono generalmente realizzati mediante sputtering o evaporazione dagli elementi costitutivi e sono tipicamente depositati su un vetro ricoperto con un film di molibdeno. La cella solare è completata con la deposizione di un film di CdS per formare una eterogiunzione seguita dalla deposizione di un film di ZnO intrinseco e uno strato conduttore e trasparente di ZnO: Al. Nell'ottica del superamento dei limiti teorici di efficienza dei dispositivi a singola giunzione, in ENEA sono state realizzate celle tandem CZTS/silicio che rappresentano i primi prototipi di dispositivo di questo genere riportati in letteratura [10].

In collaborazione con l'Università di Tor Vergata sono stati realizzati dispositivi tandem perovskite/silicio sia nella configurazione ad accoppiamento meccanico (wafer bonding), sia in configurazione monolitica (Figura 3). **Accoppiando meccanicamente le due celle con uno strumento appositamente ideato e realizzato in ENEA è stato possibile raggiungere il ragguardevole risultato di 26,3% di efficienza [11].** Anche dopo aver sottoposto la cella ad un processo di stabilizzazione in termini di illuminazione prolungata l'efficienza si è man-

tenuta ad un buon livello, assestandosi sul 25,9%. **Queste attività sono principalmente supportate dal Ministero dello Sviluppo Economico italiano nel quadro dell'Accordo Operativo con l'ENEA per la Ricerca sul Sistema Elettrico e sono svolte in collaborazione con diverse Università italiane.**

Digital-PV

Sul versante applicativo, l'ENEA sta concentrando sulla digitalizzazione pervasiva del fotovoltaico (Digital-PV) sviluppando tecnologie per la modellistica avanzata di funzionamento degli impianti e per la pianificazione ottimale della risorsa fotovoltaica.

L'incontro tra le tecniche dell'intelligenza artificiali (AI) e quelle che caratterizzano il settore energetico, sia dal punto di vista del R&D che da quello del management e della operatività degli impianti, costituisce un'area cross-disciplinare estremamente ricca e fertile di innovazioni, anche immediatamente operative. In effetti, le reti elettriche, i gasdotti, le reti idriche sono infrastrutture sulle quali si stanno già oggi sviluppando applicazioni combinate energia-AI con interessanti finalità e sorprendenti risultati.

Se restringiamo il campo al caso del fotovoltaico, quest'ultimo si distingue per una caratteristica specifica: l'elevatissimo livello di granularità degli impianti che crea l'opportunità, anche a singoli individui, di diventare soggetti attivi nel processo di transizione energetica verso le fonti rinnovabili. **In quest'ottica, il Digital-PV offre preziosi strumenti per la pianificazione della risorsa fotovoltaica in grado di consentire, come per gli esempi applicativi riportati, la migliore gestione operativa degli impianti o la determinazione ottimale del posizionamento di un impianto in relazione ad un complesso di criteri che vanno da quelli tecnico-economici a quelli sociali e di integrazione urbana e paesaggistica, sinteticamente definita "PV-suitability".**

Lavorando con i dati che hanno caratterizzato il funzionamento nel periodo 2017-2019 dell'impianto riportato in Figura 4, sono state studiate diverse metodologie di Anomaly Detection, **tecniche di Machine Learning** atte cioè a consentire di prevedere l'insorgere di un malfunzionamento in una parte qualsiasi dell'impianto stesso. Queste tecniche sono particolarmente interessanti perché consentono di minimizzare i downtime dell'impianto, abbattendo altresì i costi di O&M che, con il diminuire dei costi fissi legati

Fotovoltaico e digitalizzazione: prospettive e opportunità

La digitalizzazione è ormai l'opzione principale per favorire la più ampia penetrazione del fotovoltaico nel sistema energetico. Consente infatti di sfruttare appieno la caratteristica del PV quale fonte energetica decentralizzata offrendo strumenti *user-friendly* per il trading ed il concreto ruolo del *prosumer* (produttore/consumatore). Permette di ottimizzare in maniera spinta la producibilità dell'impianto, il controllo dell'accumulo, dei flussi energetici, l'automazione della diagnostica e delle operazioni di O&M con conseguente riduzione dei costi ed incremento della profittabilità. È essenziale anche in fase di design, sfruttando tecniche di Intelligenza Artificiale, elaborazione di immagini e dati multidimensionali caratteristici di sito. In estrema sintesi, il DIGITAL PV è il nuovo modo di pensare ad una fonte rinnovabile consolidata inserita in un sistema energetico completamente flessibile. Qui di seguito vengono illustrate alcune possibili opportunità.

Finalità dell'applicazione di tecniche Intelligenza Artificiale (AI)

Sistemi di monitoraggio intelligente (AI+IoT) - Si tratta di reti di sensori, fisici e chimici, che consentono di controllare sia componenti passivi (es. le strutture di supporto o i cavi elettrici) sia quelli attivi (es. i pannelli, i sistemi di accumulo energetico ecc.) al fine di:

- identificare anomalie e predire malfunzionamenti sulla base di tecniche di *anomaly detection* utili alla manutenzione avanzata predittiva/preventiva/revamping;
- sviluppare sistemi di classificazione del *failure mode* sulla base delle traiettorie temporali delle variabili monitorate;
- realizzare un benchmarking delle performance e applicazione di metodologie di Machine learning per la comparazione di porzioni diverse di un asset oppure di asset diversi;
- realizzare un'ispezione visuale multispettrale con UAV-Unmanned Aerial Vehicles e/o robot con tecniche di visione artificiale opzionalmente a bordo per l'identificazione e la localizzazione di anomalie spettrali (e.g. termiche) ai fini manutentivi (e.g. identificazione di soiling, crack, hotspot, corrosione, bird dropping ecc.) e revamping;

Sviluppo di Digital Twins - La "Digital Twin" è una accurata replica digitale di un impianto/prodotto fisico. Serve,

in particolare, per studiare possibili miglioramenti dei processi costruttivi e produttivi o interventi di riparazione più rapidi per possibili malfunzionamenti. In campo fotovoltaico le sue principali applicazioni sono tese a ottimizzare l'affidabilità di questa sorgente energetica attraverso:

- stima accurata e previsione della produzione energetica (PV forecasting) sulla base di modelli con componenti fisiche e statistiche che tengono conto anche delle variabili ambientali (incluso polveri sottili e diossidi di azoto);
- identificazione e monitoraggio negli andamenti di divergenze nelle variabili monitorate e, quindi, rilevazione di potenziali malfunzionamenti di impianti o singole parti per l'abilitazione di processi di manutenzione avanzata predittiva e/o reattiva;
- addestramento di sistemi di identificazione e classificazione della causa di malfunzionamento (*failure mode*);

Agenti intelligenti - Gli agenti intelligenti sono componenti software basate su tecniche di intelligenza artificiale connesse a produttori/consumatori di risorse virtuali o reali, in questo caso specifico impianti o collezioni di impianti e attori economici di vendita/consumo dell'energia. Gli agenti intelligenti interagiscono tra loro al fine di ottimizzare i propri obiettivi e sono impiegati per controllare processi specifici connessi con la produzione ed il trasposto di energia fotovoltaica.

- sviluppo di metodiche di valutazione delle transazioni energetiche decentralizzate, basate su tecniche avanzate quali metering, billing e blockchain;
- automazione del trading energetico con supporto transazioni ad alta frequenza.

Sistemi di supervisione - Si tratta di sistemi HW/SW in grado di monitorare e gestire i sottosistemi interconnessi di una rete al fine di ottimizzarne il funzionamento secondo obiettivi di qualità prefissati. Si utilizzano per:

- identificazione e previsione di mismatch locali e/o difusi;
- identificazioni di andamenti di funzionamento anomali con predizione di collassi e riconfigurazione automatica ad alta frequenza;
- controllo delle problematiche dell'impatto ambientale nell'operatività delle infrastrutture;
- ottimizzazione del *matching* consumo/produzione/storage per l'ottimizzazione dell'auto-consumo/consumo locale.

Applicazioni di Sistema Informativo Territoriale (GIS) - Sono integrazioni di livello più alto delle metodologie AI, di modellistica col GIS per creare servizi OTT a valore aggiunto.

- Integrazione di componenti architetture (e.g. altezza e disposizione edifici, orientamento e ombreggiatura) e

ambientali (e.g. qualità dell'aria) per la generazione di mappe di producibilità fotovoltaica. Quest'applicazione, in ambiente urbano, può realizzare, ad es., il "catasto solare" ad uso delle differenti componenti del mercato (Real Estate, PP.AA., Retail/Prosumer, Funding ecc.)

all'impianto stesso, stanno diventando, in percentuale, sempre più significativi nella determinazione del costo dell'energia elettrica da PV. Nella Tabella 1 sono riportati i risultati della comparazione di cinque di queste tecniche determinando, tra queste, quella più efficace per lo scopo prefissato [12].

Nell'area della PV-suitability, l'obiettivo è di realizzare strumenti utili al decisore pubblico per l'attuazione di politiche di pianificazione energetica ottimale che

includono il PV. **La metodologia messa a punto in ENEA consente di costruire un vero e proprio 'catasto solare', urbano ed extra urbano che può arrivare al dettaglio della "suitability" anche della singola facciata di edificio.** Nella Figura 5 è, ad esempio, rappresentato il risultato dell'applicazione di queste tecniche al territorio del Comune di Portici (NA) dove sono evidenti, in termini di colorazione differenti, le rese energetiche ottenibili dai singoli tetti.

Un tale risultato estende l'interesse per tale strumento agli operatori del settore ed ai singoli cittadini [13].

(*) *Ezio Terzini, Responsabile Divisione Fotovoltaico e Smart Devices; Paola Delli Veneri, Responsabile Laboratorio Dispositivi Innovativi; Girolamo Di Francia, Responsabile Laboratorio Sistemi ed Applicazioni Fotovoltaiche e Sensoristiche; Mario Tucci, Responsabile Laboratorio Ingegneria per l'Industria Fotovoltaica.*

BIBLIOGRAFIA

1. Shell Scenarios - SKY - www.shell.com/skyscenario
2. Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050 – IRENA April 2020
3. IEA- World Energy Outlook 2019
4. Snapshot of Global PV Markets 2020 – IEA-PVPS
5. Rapporto statistico Solare Fotovoltaico 2019 - GSE Giugno 2020
6. ITRPV, International Technology Roadmap for Photovoltaic—2018 Results
7. SunPower, X-Series Residential Solar Panels SunPower Residential Solar Panels Engineered for Peace of Mind X-Series, <https://us.sunpower.com/solar-panels-technology/x-series-solar-panels>
8. K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, *Nat. Energy* 2017, 2, 17032
9. A. Richter, M. Hermle, S. W. Glunz, *IEEE J. Photovoltaics* 2013, 3, 1184
10. Valentini, M., Malerba, C., Serenelli, L., Izzi, M., Salza, E., Tucci, M., Mittiga, A., "Fabrication of monolithic CZTS/Si tandem cells by development of the intermediate connection", (2019) *Solar Energy* 190, 414-419, DOI:0.1016/j.solener.2019.08.029
11. E. Lamanna, F. Matteocci, E. Calabrò, L. Serenelli, E. Salza, L. Martini, F. Menchini, M. Izzi, A. Agresti, S. Pescetelli, S. Bellani, A. Esau' Del Río Castillo, F. Bonaccorso, M. Tucci, and A. Di Carlo, *Joule* 4, 1–17, April 15, 2020
12. Ferlito et al. AISEM 2020 Proceedings of the 2020 Regional AISEM Workshop
13. Fattoruso et al. Proceedings of the 2020 Regional AISEM Workshop

¹ Il drogaggio si ottiene inserendo nel semiconduttore atomi estranei di opportuna valenza chimica (es. boro o fosforo) in modo che i portatori di carica maggioritari siano elettroni (semiconduttore di tipo n) o lacune (semiconduttore di tipo p)