

*S. Lombardo, A. Mordini, P. De Natale,
A. Sanson - CNR
S. Castello, E. Terzini - ENEA
S. Guastella - RSE*

DESCRIZIONE TECNICA

La tecnologia fotovoltaica consente di produrre energia elettrica sfruttando la radiazione solare. La trasformazione diretta avviene tramite celle fotovoltaiche che sfruttano la proprietà di alcuni materiali semiconduttori di generare elettricità se colpiti da radiazione solare. Il materiale prevalentemente utilizzato per produrre celle fotovoltaiche è il Silicio a cristallo singolo (monocristallino) o a cristalli multipli (policristallino). Altri materiali sono i cosiddetti “film sottili” (quali silicio amorfo, tellururo di cadmio, diseleniuro di indio e rame). Le celle a film sottili sono basate su materiale semiconduttore depositato in strati molto sottili (dell’ordine del micron) e sono sviluppate con l’obiettivo di ridurre i costi con processi di produzione su grande scala. Questi materiali hanno ancora oggi problemi di stabilità in esercizio, di rendimento di conversione e di convenienza economica nel processo costruttivo. I dispositivi di “terza generazione” incorporano tecnologie in evoluzione per mezzo delle quali si vuole raggiungere un rapporto costi/efficienza particolarmente vantaggioso. Rispetto al fotovoltaico tradizionale queste tipologie di celle sono più versatili sia dal punto di vista dei materiali utilizzati che dei loro potenziali impieghi. Le tecniche di fabbricazione sono inoltre potenzialmente a basso costo e richiedono un impiego molto limitato di energia abbattendo i costi energetici di produzione e di conseguenza i tempi di payback energetico. Alla terza generazione appartengono le celle solari a colorante (DSSC)[1], le celle fotovoltaiche organiche e polimeriche (OPV)[2], le celle a base di perovskiti (soprattutto ibride alogenuro come $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$, PSC)[3] e quelle facenti uso di nanoparticelle e nanocristalli colloidali (colloidal quantum dots, CQDSC)[4]. Nel caso di OPV e DSSC, lo stadio della ricerca è certamente più avanzato rispetto alle celle solari a base perovskitica e le realizzazioni tecniche hanno già permesso l’ottenimento di moduli di medie/grandi dimensioni per i quali costituisce un imperativo l’ottenimento di stabilità accettabili. Le celle PSC (di recentissima introduzione) in fase di sviluppo in laboratorio, costituiscono il fronte di ricerca più innovativo nell’ambito del fotovoltaico di terza generazione. Grazie alle proprietà delle perovskiti, i dispositivi che li inglobano hanno raggiunto e superato in pochissimi anni lo stato dell’arte del fotovoltaico da “soluzione”: dispositivi multistrato, flessibili, stabili e semitrasparenti toccano efficienze certificate superiori al 20%. Ad oggi, le celle solari a base perovskitica si configurano come la più promettente tecnologia di celle solari a basso costo, rappresentando in un prossimo futuro un’alternativa concreta al fotovoltaico basato sul silicio. Le CQDSC, pur con efficienze più basse, presentano anch’esse potenzialità per essere applicate al fotovoltaico di nuova generazione: i nanocristalli colloidali, infatti, permettono di assorbire efficientemente la porzione nell’infrarosso dello spettro solare. Una delle caratteristiche comuni a tutti i dispositivi di seconda e terza generazione è la possibilità di facile integrazione negli edifici (il cosiddetto BIPV, building-integrated photovoltaics), grazie alle loro caratteristiche di adattabilità strutturale, bassa perdita di efficienza a bassa illuminazione e ad angoli di lavoro non ottimali, peso ridotto, (semi)trasparenza e, almeno nel caso delle OPV e DSSC, colorazione variabile.



Impianto fotovoltaico con sistema di accumulo (nel riquadro) presso il CR ENEA di Lampedusa

Internazionale

Alla fine del 2014 in Europa erano installati più di 80 GW di impianti FV, con un incremento annuo in decrescita (Figura 1) dopo la forte riduzione degli incentivi nazionali. La Germania e l'Italia sono i paesi con maggiore potenza installata (Figura 2) rispettivamente 38,2 e 18,6 GW [1]. Questi due paesi si collocavano nel 2012 al primo e al secondo posto fra i paesi "Top 10 PV market" a livello mondiale; nel 2014 Regno Unito e Germania occupavano il 4 e il 5 posto [5]. Ciò sta a denotare come il business FV, anche se ancora rilevante in Europa, sta crescendo molto di più in altre aree geografiche mondiali, quali Cina, Giappone e USA.



Figura 1 Potenza FV installata in varie aree [5]



Figura 2 Potenza FV installata in Europa [5]

Si sottolinea come circa il 90% della potenza fotovoltaica globalmente installata sia ancora ottenuta da pannelli a base di silicio cristallino (efficienze di conversione anche superiori al 17%), con le tecnologie a film sottile che coprono il restante 10% del mercato [6].

Le tecnologie di nuova generazione pur essendo già state inserite in alcuni prodotti commerciali [9] non forniscono ancora una produzione elettrica significativa.

Dal punto di vista della ricerca scientifica, l'Europa è leader nella tecnologia PSC; le celle con efficienza di conversione di potenza più alta (20%) sono state realizzate da due laboratori europei (Politecnico di Losanna e l'Università di Oxford). Le OPV e DSSC, tecnologie più mature rispetto alle PSC, presentano efficienze delle singole celle ad oggi

più basse. Per OPV si registra un valore di efficienza certificata del 10,8% e per DSSC dell'11,9% (sebbene siano stati riportati valori fino al 13% su dispositivi rigidi e 7,6% per dispositivi flessibili). L'efficienza certificata dei moduli ha raggiunto ormai valori ragguardevoli: per l'OPV in moduli rigidi sono riportate efficienze dell'8,7% (Toshiba) e in moduli flessibili e trasparenti (colorati) del 4,5%. Per le DSSC il valore più alto certificato è dell'8,2% (Sharp).

Nazionale

In Italia, alla fine del 2014, erano in esercizio circa 650.000 impianti per 18,6 GW installati e 22,3 TWh elettrici prodotti [7][8]. Tale ampia presenza di impianti fotovoltaici in Italia è avvenuta grazie agli incentivi del "Conto Energia" (Figura 3) risultati determinanti visto che il costo del kWh prodotto dalla tecnologia fotovoltaica era più elevato rispetto alle fonti tradizionali, soprattutto negli anni iniziali del Programma di incentivazione. Il consistente trend di diminuzione dei costi degli impianti fotovoltaici ha portato, nelle regioni più soleggiate d'Italia (Sicilia, Puglia, Calabria e Sardegna), a raggiungere la "grid-parity" (cioè il punto in cui l'energia elettrica prodotta con questa fonte energetica uguaglia il costo dell'energia prelevata dalla rete elettrica per l'utente finale). In tali zone d'Italia la produzione di energia elettrica annua con impianti fotovoltaici (correttamente progettati, installati e gestiti) raggiunge valori di 1.610 kWh/kWp a Messina contro i 1.450 a Roma e 1.260 a Milano [4].

La regione italiana che a fine 2014 produceva più elettricità da fonte solare era la Puglia (2.59 GW). La produzione nel suo complesso risulta ben distribuita su tutto il territorio nazionale con un totale di circa 648.000 impianti, per la maggior parte di piccole dimensioni [10]. Solo 86 impianti utility-scale (sopra 10 MW), il più grande dei quali da circa 85 MW, sono attualmente presenti in Italia per una produzione totale di 901 MW. In base ai dati disponibili, si può concludere che alla fine del 2014 il solare fotovoltaico era in grado di soddisfare circa il 7% della domanda elettrica nazionale.

Si evidenzia come anche in Italia la stragrande maggioranza degli impianti in attività è basata sulle tecnologie del silicio cristallino: alla fine del 2014, solo circa il 7% della potenza fotovoltaica complessiva era fornita da impianti a film sottile (principalmente silicio amorfo e CIGS), pari a circa 1,3 GW [11]. Considerando la superiore integrabilità architettonica delle tecnologie thin-film (nonché di quelle emergenti) rispetto a quelle "classiche", che si evidenzia nella possibilità di costruire pannelli flessibili e (semi) trasparenti, e che quasi il 50% degli impianti fotovoltaici in Italia è montato su edifici, un miglioramento nelle loro caratteristiche di efficienza e stabilità potrebbe portare in futuro ad un deciso aumento nel loro utilizzo.

TRL (TECHNOLOGY READINESS LEVEL)

- film sottili “tradizionali” (a base di CdTe, CIGS o silicio amorfo): TRL 9. Questa tecnologia è ormai commercialmente disponibile da vari anni
- film sottili a base di kesteriti: TRL 3. Questa tecnologia è stata dimostrata su piccola scala in laboratorio, ma non sono ancora stati prodotti pannelli basati su di essa
- dye Sensitized Solar Cells: TRL 7. A seconda dei differenti substrati e della natura dei componenti, si è passati dalla dimostrazione di prototipi alle installazioni permanenti a piena scala. Non esistono tuttavia prodotti disponibili sul mercato (se si eccettuano piccoli moduli per la ricarica di dispositivi elettronici)
- fotovoltaico Organico (OPV): TRL 6. La tecnologia è stata dimostrata in forma di modulo e in ambiente operativo, ma non è ancora disponibile sul mercato
- celle a Perovskiti (PSC): TRL 3-4. Dispositivi su scala di laboratorio per valutazione meccanismi di degradazione e meccanismi fondamentali di funzionamento; moduli su scala leggermente maggiore testati sia indoor sia outdoor
- nuove tecnologie per l'aumento dell'efficienza di celle al silicio: TRL 3-4. Gli studi in questo settore sono a livello di dimostrazione di laboratorio.

RELAZIONE CON LE FONTI ENERGETICHE

Non sono presenti interazioni con altre fonti energetiche. Sono invece presenti possibili interazioni con altre tecnologie, quale quella solare termica. Impianti fotovoltaici a tetto possono competere in termini di spazio con le installazioni di impianti solari per la produzione di acqua calda o per calore a bassa temperatura, mentre impianti fotovoltaici a terra possono competere, sempre in termini di spazio, con le installazioni di impianti solari termodinamici per produzione di energia elettrica o a impianti fotovoltaici a concentrazione solare.

VERSATILITÀ (CAPACITÀ DI IMPATTARE SU PIÙ SETTORI)

Lo sviluppo di competenze nel campo della deposizione e del trattamento dei semiconduttori, sia organici che inorganici, può avere un impatto positivo sul settore elettronico, ad esempio per quanto riguarda la produzione di sensori, transistor o di sistemi di illuminazione innovativi (OLED e sistemi simili).

Ne deriverebbero miglioramenti nelle tecniche di deposizione su larga scala (inkjet-printing, roll-to-roll) e su substrati flessibili con basso costo di produzione.

In aggiunta, lo sviluppo di sistemi per la generazione distribuita di energia elettrica da fonti rinnovabili non programmabili sarà accompagnato dalla necessità di progettare tecnologie di accumulo elettrico, dispositivi per il condizionamento della potenza e soluzioni ICT per ottimizzare la gestione dei flussi energetici in una rete elettrica intelligente (Smart Grid), con la possibilità di accumulare un significativo capitale di proprietà intellettuale in tali settori.

POTENZIALE DI DIFFUSIONE IN AMBITO NAZIONALE

La risorsa energetica solare risulta distribuita su tutta la superficie terrestre con un'ampia variabilità che privilegia le aree comprese fra i due tropici. Le aree più soleggiate hanno un valore di densità di radiazione solare annua pari a circa 7 kWh/m²/giorno, mentre ampie aree europee, asiatiche, americane e australiane raggiungono in media i 5 kWh/m²/giorno. Valori di radiazione solare annua pari a circa 1 kWh/m²/giorno si registrano nelle zone prossime ai circoli polari terrestri. La risorsa energetica solare in Italia è più consistente nelle zone meridionali, come noto e come indicato dai livelli di Radiazione globale solare annua sul piano orizzontale per le varie località italiane (Figura 3) [15].

La producibilità energetica degli impianti fotovoltaici (o ore equivalenti di funzionamento alla potenza nominale) dipende principalmente dalla tecnologia dei moduli, dalla zona climatica di installazione e dalle modalità di installazione (piano dei moduli con inclinazione e orientazione ottimale, non ottimale o con inseguimento solare su uno o due assi), oltre che dalla qualità degli inverter, della progettazione, dell'installazione e della gestione (Tabella 1). La natura del territorio, costituito in



Figura 3 Livelli di radiazione solare in Italia

Tecnologia	Zona geografica	Radiazione solare su piano moduli kWh/m ²	PR	Producibilità kWh/kWp
Silicio cristallino	Nord	1.490	0,80	1.192
			0,85	1.267
	Centro	1.710	0,80	1.368
			0,85	1.454
	Sud	1.900	0,80	1.520
			0,85	1.615
Film sottile	Nord	1.490	0,70	1.043
			0,80	1.192
	Centro	1.710	0,70	1.197
			0,80	1.368
	Sud	1.900	0,70	1.330
			0,80	1.520

Tabella I Producibilità degli impianti FV al variare delle zone di installazione e della tipologia di moduli utilizzati, nel caso di impianti correttamente progettati, installati e gestiti [16]

maggioranza da zone collinose e montagnose, spesso non consente la messa in opera di impianti fotovoltaici dalla elevata superficie, che è possibile solo in alcune zone (es., in Puglia, dove il 76% degli impianti fotovoltaici è del tipo a terra [17]). Ne consegue che, per utilizzare al meglio la risorsa solare in tutta Italia, andrebbe potenziata la possibilità di installare impianti fotovoltaici su edifici, ovvero su serre o pensiline, opzione in buona parte già realizzata con le tecnologie a base di silicio, ma per la quale le nuove tecnologie sopra descritte sembrano particolarmente adatte (implementazione del concetto di BIPV).

IMPATTO E SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

La tecnologia fotovoltaica ha un impatto ambientale molto contenuto. Le analisi di impatto legati alla produzione elettrica da fotovoltaico mostrano valori di gran lunga inferiori a quelli del ciclo combinato a gas naturale (che, dal punto di vista ambientale, rappresenta la migliore tecnologia fossile disponibile). Uno studio RSE sul Life Cycle Assessment degli impianti fotovoltaici, condotto secondo la ISO 14040, evidenzia che non esiste una combinazione tecnologia/installazione migliore per tutti gli impatti analizzati, ma che in generale l'utilizzo di fotovoltaico presenta dei vantaggi in termini ambientali rispetto alle tecnologie fossili [16]. Il consumo di materie prime per la tecnologia fotovoltaica è relativo alla fase di costruzione di celle e moduli (soprattutto silicio) ed è tollerabile anche per installazioni fotovoltaiche molto più ampie di quelle attuali. La produzione di rifiuti, invece è relativa: alla fase di costruzione di celle e moduli, ed è molto contenuta; alla fase di recupero e riciclaggio a fine, ed è regolamentata dalla DLgs. 49/2014 sui RAEE che ha recepito la Direttiva Europea 2012/19/UE sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche.

Inoltre, nell'impiego della tecnologia fotovoltaica non si fa ricorso all'utilizzo della risorsa idrica né vengono provocate emissioni di CO₂ o di altri inquinanti. La principale contropartita per la tecnologia fotovoltaica riguarda un rilevante consumo di suolo, nel caso delle installazioni a terra.

Per quanto riguarda i moduli a film sottile, una recente analisi ha mostrato come la carbon footprint delle varie tecnologie possa diminuire significativamente all'aumentare della capacità di produzione, e come la migliore alternativa sia costituita dai moduli in CdTe (che peraltro potrebbero porre problemi in fase di smaltimento), per i quali il rapporto tra grammi di CO₂ emessi in atmosfera e kWh prodotti è del 30-47% minore rispetto al a-Si e ai CIGS (ca. 14 g CO₂-eq/kWh in valore assoluto) [18]. Un'approfondita analisi LCA dei dispositivi fotovoltaici organici, e un confronto con le altre tecnologie concorrenti, ha mostrato come l'OPV sia piuttosto competitivo in termini di energia consumata per la sua produzione, soprattutto grazie all'assenza di alte temperature nel procedimento produttivo: i valori ottenuti (espressi come rapporto GJ consumati per la fabbricazione/kWp prodotti) sono decisamente inferiori rispetto a quelli riscontrati per il silicio mono e poli - cristallino, e confrontabili con quelli delle DSSC e delle tecnologie thin-film più comuni (ca. 30-60 GJ/kWp) [19]. L'energy payback time (EPBT), ovvero il tempo necessario per produrre la stessa energia consumata nella fabbricazione del modulo, appare inoltre inferiore a quello calcolato per il silicio cristallino, e simile rispetto a quanto trovato per CdTe, a:Si e DSSC [19,20].

Uno studio recente molto dettagliato sull'LCA delle celle DSSC mette a confronto i risultati sui parametri ambientali ed energetici con quelli delle altre tecnologie più popolari. Rispetto ai thin film (con l'esclusione della tecnologia nota come "micromorph", costituita da una combinazione di silicio cristallino e amorfo), le DSSC hanno un notevole vantaggio in termini di domanda energetica complessiva (riduzione del 48-66%) ed emissioni di CO₂ (riduzione del 49-76%), specialmente considerando la possibilità di realizzarle usando un substrato plastico trasparente invece che vetroso; ciò si risolve in una riduzione dell'EPBT di 8-14 mesi. Data l'assenza di procedure industriali consolidate è tuttavia necessario sottolineare come tali dati debbano essere presi con cautela [21].

Emissioni CO₂/MWh

Nessuna emissione di CO₂ viene generata con l'utilizzo della fonte energetica solare fotovoltaica, nella fase di esercizio. I valori relativi agli studi LCA, permettono invece di stimare le emissioni per ciascuna tecnologia: Si: 21 g CO₂-eq/kWh (assumendo 2.400 kWh/m²/anno di irraggiamento solare, efficienza 6,3% e performance ratio di 0,75); CIGS: 27 g CO₂-eq/kWh (stesse assunzioni, ma con efficienza 11,5%); CdTe: 14 g CO₂-eq/kWh (stesse assunzioni, ma con efficienza 10,9%) [18]; OPV: 37,8 g CO₂-eq/kWh (assumendo 1.700 kWh/m²/yr di irraggiamento solare, efficienza 3% e performance ratio di 0,8)[20]; DSSC: ca. 40 g CO₂-eq/kWh (assumendo 1.700 kWh/m²/yr di irraggiamento solare, efficienza 8% e performance ratio di 0,75)[21].

Emissioni CO₂/MWh evitate

Le emissioni CO₂/MWh evitate sono correlate alla mancata produzione di generatori da fonti fossili utilizzati nel mix del parco di generazione italiano, in conseguenza della produzione da fonte fotovoltaica.

Dati preliminari di Terna [8] indicano che nel 2015 la produzione fotovoltaica è stata pari a 24.676 GWh.

EFFICIENZA, TEMPO DI VITA E RENDIMENTO PREVISTI

Come riportati in differenti studi [22], i livelli prestazionali degli impianti fotovoltaici sono progressivamente e costantemente in aumento. Le principali problematiche che hanno limitato le prestazioni nel passato erano soprattutto legate ad errori progettuali, scarsa affidabilità degli inverter d'impianto, ridotta efficienza degli algoritmi per l'inseguimento del punto di massima potenza (MPPT), lunghi tempi di riparazione dei componenti malfunzionanti e problemi derivanti dall'ombreggiamento dei moduli FV. Il miglioramento tecnologico dei componenti d'impianto, in termini di prestazioni e affidabilità, unitamente alla maggiore esperienza acquisita dagli operatori del settore (installatori, manutentori, ecc.), hanno consentito di mitigare o risolvere buona parte delle sopramenzionate problematiche.

Valori tipici del Performance Ratio (PR, fattore di prestazione cioè la frazione di energia generata rispetto a quella producibile teoricamente) degli impianti fotovoltaici sono passati da 50-75% negli anni '80, a 70-80% negli anni '90, fino a valori superiori a 80% negli ultimi anni. Indicativamente, a quanto emerso da analisi effettuate su vari impianti in esercizio [23], un impianto ben funzionante presenta valori del PR di circa 80-85%; valori più bassi evidenziano problemi di funzionamento dell'impianto e comportano una diminuzione della produttività che può essere recuperata con idonei interventi di manutenzione. Gli impianti di grossa taglia sono generalmente caratterizzati da valori di PR più elevati e ciò è attribuibile, oltre che alla più attenta progettazione e selezione dei componenti, alla manutenzione accurata cui sono sottoposti anche grazie a sistemi di monitoraggio e analisi dei dati di funzionamento.

I moduli realizzati in silicio cristallino (poli e mono) si confermano i più performanti in termini di output energetico [23].

I moduli in film sottile mostrano prestazioni più variegata, con alcune tecnologie caratterizzate da prestazioni energetiche soddisfacenti (CdTe) e altre particolarmente scadenti (Silicio amorfo) [23]. L'affidabilità a lungo termine dei moduli fotovoltaici e il mantenimento delle prestazioni iniziali nel tempo sono aspetti chiave per il successo "commerciale" di un impianto, ossia per l'ottenimento dei tempi di rientro dell'investimento previsti in fase di progetto.

La diminuzione media annua della potenza dei moduli (detta comunemente "degradation rate") dipende dalle differenti tecnologie. Uno dei più rappresentativi studi effettuati su questo argomento, in termini di ampiezza del campione analizzato, riporta che una diminuzione media della potenza dei moduli FV si può ritenere pari a -0,8%/anno (% calcolata rispetto alla potenza nominale iniziale del modulo) [15, 23] con valori più contenuti per moduli in Si-cristallino (circa -0,5%/anno), e più ampi per i vari moduli in film sottili (tra -1 e -2%/anno).

PAYBACK TECNOLOGICO, DI INVESTIMENTO E DI OPERATION AND MAINTENANCE PREVISTO

Nel corso degli ultimi anni si è assistito a una decisa riduzione dei costi specifici degli impianti fotovoltaici connessi alla rete (Figura 4a) seppure con valori differenti nelle due tipologie prevalenti: installazioni sugli edifici (in generale sui tetti di fabbricati residenziali con integrazione architettonica più o meno efficace) e a terra. In Italia il trend di riduzione dei prezzi è ancora evidente anche se non è così consistente come era stato negli anni 2010 e 2011, quando aveva superato il 30% annuo (Figura 4b).

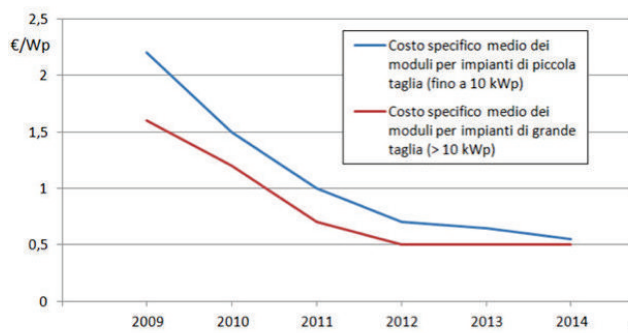
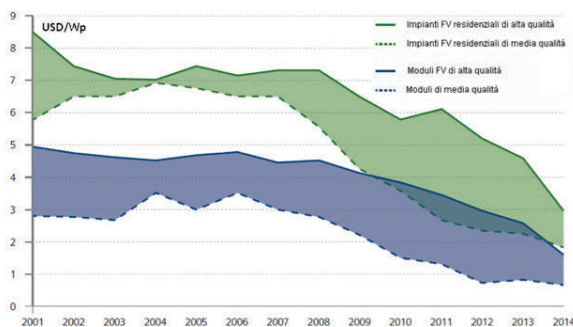


Figura 4 a) Andamento medio del prezzo di moduli e impianti FV su fabbricati residenziali nei paesi membri dell'IEA PVPS [5] e dei moduli fotovoltaici in Italia (b) [7]

Anche dopo la fine delle tariffe incentivanti in Italia, gli impianti fotovoltaici sono una fonte energetica a costo competitivo in varie aree geografiche caratterizzate da una buona radiazione solare. Il costo del kWh prodotto da questi impianti ha raggiunto in Italia valori compresi fra 97 €/MWh (indicativi, per un impianto da 2 MW localizzato al Sud) a 184 €/MWh (per un impianto da 3 kW senza detrazioni fiscali localizzato al Nord). Vari studi indicano che l'energia solare fotovoltaica diventerà in futuro la più economica fonte energetica nelle zone più soleggiate, giacché ci si aspetta che raggiungerà i 40-60 €/MWh nel 2025 e 20-40 €/MWh nel 2050, sebbene permangano incertezze legate agli aspetti regolatori e finanziari che potrebbero costituire barriere per il raggiungimento di tali traguardi soprattutto in alcune aree geografiche [16].

Tuttavia se l'obiettivo della "grid parity" (quando il costo di produzione dell'impianto è uguale o inferiore al costo dell'energia sostenuto dall'utente finale) è già stato raggiunto sia per consumatori residenziali che per consumatori industriali, in caso di autoconsumo dell'intera produzione (facilitato nei casi si possa accedere allo scambio sul posto), occorrerà ancora molto tempo per raggiungere la "market parity" (quando il costo di produzione è uguale o inferiore al prezzo all'ingrosso dell'energia), anche tenendo conto del probabile incremento a lungo termine dei costi del gas e di quello associato alla CO₂ emessa [16].

Per quanto riguarda l'Operation and Maintenance, gli impianti FV sono generalmente affidabili se confrontati con altre tecnologie per la generazione di energia: si ha assenza o quasi di parti meccaniche in movimento (fatta eccezione per eventuali strutture ad inseguimento solare), non si ha alimentazione di combustibile, generazione di rumore, scorie o emissioni inquinanti in atmosfera. I componenti utilizzati sono solitamente caratterizzati da una lunga aspettativa di vita e da manutenzione ridotta rispetto ad es. ad una centrale termoelettrica tradizionale. Sebbene il livello di manutenzione richiesto o raccomandato possa variare notevolmente a seconda della tipologia dell'impianto o di eventuali obblighi contrattuali sulla produzione energetica dell'impianto, occorre tenere conto di alcune azioni minime di manutenzione che è bene eseguire periodicamente in quanto, se trascurate, possono favorire il manifestarsi delle problematiche che più frequentemente si verificano in campo.

Nel contesto italiano è sempre maggiore il numero di imprese specializzate in attività di O&M, poiché molti dei primi impianti FV (2010-2012) a breve non saranno più coperti dalle garanzie (contratti di manutenzione) stipulate in fase di costruzione (solitamente 3 o 5 anni). Gli occupati nel settore dell'O&M degli impianti FV in Italia nel 2014 sono stati stimati in 5 000, mentre il business generato da tale attività è stato considerato pari a circa 400 M€ [7].

I costi di gestione di un impianto fotovoltaico (Tabella 2) sono composti da:

- costi fissi di esercizio, che dipendono dalla taglia dell'impianto e includono i costi di esercizio ordinario, di assicurazione e, per gli impianti di taglia rilevante (superiore a 500 kW), di concessione in uso dell'area impegnata dall'impianto fotovoltaico;
- costi variabili di esercizio, che dipendono dalla taglia dell'impianto e includono i costi di manutenzione dell'impianto, che in generale aumentano con il progredire della vita dell'impianto; il valore indicato in Tabella 2 è rappresentativo di una media pesata sulla vita utile dell'impianto.

Potenza (kWp)	Tipo di installazione	Costi fissi di esercizio [k€/anno]	Costi variabili di esercizio [€/kWh]
3	A tetto	0,2	0,0513
20	A tetto	0,4	0,0308
2000	A terra	40	0,0231

Tabella 2 Costi di gestione di un impianto fotovoltaico [16]

PRINCIPALI OSTACOLI ALLO SVILUPPO

Uno dei principali ostacoli è rappresentato dall'indisponibilità di connessione alla rete elettrica in varie aree geografiche. Risulta pertanto necessario perseguire con costante impegno la strada, già intrapresa, di regolamentare accuratamente la connessione di nuovi impianti fotovoltaici nel sistema elettrico nazionale per garantire la qualità del servizio elettrico. Un altro rilevante ostacolo potrà essere costituito dall'impossibilità di installare impianti fotovoltaici centralizzati a terra. Per raggiungere la potenza complessiva necessaria al 2030 di 35 GW totali, poiché quella realisticamente installabile sugli edifici non è sufficiente, occorreranno prudenzialmente 7-8 GW da realizzare con grandi e medi impianti a terra [16]. Attualmente la soluzione di impianti FV a terra non è facilmente percorribile a causa delle limitazioni sull'utilizzo di suolo; è necessaria una specifica programmazione governativa integrata con una collaborazione adeguata degli enti locali per superare tali limitazioni, ad esempio mediante utilizzazione di aree già munite di autorizzazione e collegate alla rete elettrica, utilizzo di zone industriali dismesse e aree non utilizzabili per agricoltura; il tutto dovrebbe essere accompagnato dalla semplificazione dell'iter dell'Autorizzazione Unica.

POTENZIALITÀ DI SVILUPPO TECNOLOGICO IN AMBITO NAZIONALE E IMPATTO SUL PIL

In Figura 5 è riportato il valore del business generato dal mercato FV in Italia e in altri Paesi, rapportato al loro Prodotto Interno Lordo [5, 24].

In Italia, come in altri paesi europei, la realizzazione di impianti fotovoltaici è avvenuta principalmente con il supporto delle incentivazioni governative (Programma "Conto Energia"). Con la conclusione di tali incentivi, il volume d'affari annuo si è notevolmente ridotto (Tabella 3) mantenendo nel 2014 l'apprezzabile valore di 2,3 Miliardi di Euro, in diminuzione rispetto ai 2,8 Miliardi di Euro del 2013. Tale volume d'affari è stato generato in vari settori d'attività, quali principalmente ricerca e sviluppo, produzione, distribuzione, installazione, manutenzione e formazione.

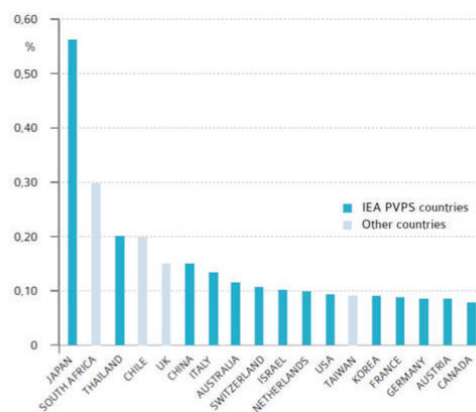


Figura 5 Valore del business generato dal mercato FV sul PIL (%)

	2011	2012	2013	2014
Valore del business generato dal mercato FV, in Miliardi di Euro	15,0	4,6	2,8	2,3
Stima dei posti di lavoro generati dal mercato FV	55.000	16.000	10.000	12.000

Tabella 3 Valore del business e stima dei posti di lavoro generati dal mercato FV in Italia [7]

POTENZIALITÀ DI ESPORTAZIONE DELLA TECNOLOGIA

Nel campo dei moduli fotovoltaici e dei componenti BOS (Balance Of System, ovvero tutto ciò che negli impianti FV non è costituito da moduli), nel 2014 in Italia le principali aziende costruttrici di moduli e quelle di inverter erano rispettivamente 14 e 8.

Tenendo conto degli asset produttivi italiani e della dimensione del mercato nazionale (prevista intorno a 0,5 - 1,0 GW/anno), la strada dell'internazionalizzazione è sempre più uno strumento necessario per l'industria italiana di moduli e inverter fotovoltaici. Le esportazioni nel 2014 hanno riguardato soprattutto inverter fotovoltaici. In tale anno, è stato stimato [7] che le esportazioni di moduli e inverter fotovoltaici siano state pari a circa 1 550 M€, con un'importazione di circa 180 M€.

MAGGIORI ATTORI ITALIANI COINVOLTI

Utilizzo della tecnologia

Nel 2014 e 2015 sono consistentemente aumentate le Società di O&M e in generale di servizi per la gestione degli impianti fotovoltaici. Si ritiene che questo settore manterrà nei prossimi anni l'attuale livello di business, oltre che quello occupazionale, poiché dovrà provvedere alla buona gestione di un parco di generazione costituito da circa 650.000 impianti fotovoltaici per una potenza complessiva superiore a 19 GW.

Fra gli operatori di impianti fotovoltaici in Italia, con varie attività ed entità di business, si citano: RTR Energy, Enel Green Power, F2i Solare – HFV (F2i solare – HFV e Enel Green Power hanno avviato la formazione di una Joint Venture), 9REN, VEI Green, Terni Energia, FORVEL, Graziella Green Power, Solar Ventures, Solar Investment Group, Volteo Energie, SILFAB Srl, API Nuova energia, Sunnergy Group SpA, Manni Energy.

A questi si aggiungono, aziende o cooperative edili, che possono integrare i moduli fotovoltaici di seconda e terza generazione in edifici di nuova costruzione, oppure usarli per riqualificare vecchi edifici dal punto di vista energetico; e aziende agricole o vivaistiche, che possono sfruttare lo spazio inutilizzato su serre (ad esempio le pareti laterali) per installare pannelli fotovoltaici, che contribuirebbero così al soddisfacimento del fabbisogno energetico.

ECCELLENZE IN TERRITORIO NAZIONALE

Diverse sono le eccellenze di R&D presenti nel territorio nazionale in ambito fotovoltaico:

- **ENEA:** svolge ricerche sulle diverse tipologie di celle (silicio, film sottile, soluzione in eterogiunzione e tandem, ecc.), sull'integrazione architettonica del PV negli edifici, sui sistemi fotovoltaici completi e sui modelli per l'integrazione ottimale nella rete elettrica, anche con riferimento alle tecnologie di accumulo dell'energia e la gestione della rete. ENEA sta effettuando la sperimentazione di impianti fotovoltaici connessi alla rete con differenti tecnologie di accumulo nell'isola di Lampedusa
- **Ricerca per il Settore Energetico RSE:** si occupa di ricerca, sviluppo e caratterizzazione di moduli fotovoltaici innovativi, valutazioni delle prestazioni, mediante misure in campo ed elaborazioni di dati di funzionamento di lungo periodo (<http://pvmonitoring.rse-web.it>); svolge ricerca e dimostrazione per elettrificazione di comunità isolate, quali ad esempio villaggi isolati e sistemi elettrici delle Isole minori italiane non connesse alla rete nazionale
- **CNR:** tramite dieci istituti della sua rete, sviluppa materiali e processi innovativi per diverse generazioni di celle (silicio, film sottile, terza generazione), verificando la possibile integrazione in materiali polimerici o fibrosi e la building integration; studia materiali e processi per le celle perovskitiche e organiche di nuova concezione.

Diverse Università si occupano di questa tecnologia, si citano a questo riguardo:

- **Università degli Studi di Milano-Bicocca:** sviluppo di nuove procedure per la deposizione di film sottili di calcogenuri; progettazione e sviluppo di celle DSSC e a base perovskitica

Sviluppo della tecnologia

Nel fotovoltaico a film sottile:

- **3SUN** (Catania): fabbrica di pannelli fotovoltaici a film sottile multi-giunzione (a:Si), nata da una Joint Venture tra Enel Green Power, STMicroelectronics e Sharp. 3SUN ha avviato la produzione su scala industriale nel dicembre 2011 e da allora ha prodotto più di 4 milioni di pannelli, equivalenti a 500 MW di potenza. Enel Green Power ha rilevato il 6 Marzo 2015 le quote di Sharp e STMicroelectronics, pari ciascuna ad un terzo del capitale sociale dell'azienda, divenendo così l'unica proprietaria di 3SUN.
- **MegaCell** (Padova), che ha acquisito di recente Helios Technology, si focalizza sulla cella bifacciale monocristallina N-type BiSoN (Bifacial Solar N-type), ad altissima efficienza e a costo competitivo, prodotta presso gli stabilimenti di Carmignano di Brenta (Padova) con una capacità produttiva di 80 MW annui.

Nel settore del fotovoltaico di nuova generazione:

- **TRE Tozzi Renewable Energy** (Ravenna): azienda che si occupa dello sviluppo sperimentale di moduli DSSC semitrasparenti su substrato vetroso per una futura commercializzazione.
- **Consorzio DyePower** (Roma): società a capitale misto pubblico/privato (vi partecipano le Università di Roma "Tor Vergata", di Torino e di Ferrara) che si occupa dello scale-up nella produzione di pannelli fotovoltaici DSSC e PSC, progettati specialmente per l'impiego nell'edilizia e nel settore del BIPV.

I principali Costruttori di moduli fotovoltaici sono [2]: Azimut, Ferrania Solis, Megacell, Meridionale Impianti, Micron - Cappello Group, Solsonica, SPS ISTEM, Sunerg Solar, V-Energy, Futura Sun, 3SUN – Enel Green Power. Quelli di inverter invece: ABB, Powerone, Elettronica Santerno, Aros solar technology, Bonfiglioli, Friem S.p.A., FIMER S.p.A, Siel Italy, EEI. Equipaggiamenti Elettronici Industriali S.r.l.

A questi si aggiungono i laboratori di prova: Modulo Uno Eurofins (Pavia), Albarubens (VA), Eurotest laboratori(PD), Creiven (PD), Ercos - Kiwa CERMET Italia (MI)

- **Università degli Studi di Firenze:** studi su kesteriti ternarie (es. $Cu_xSn_yS_z$) e quaternarie (es. Cu_2ZnSnS_4) come nuovi materiali fotovoltaici; investigazione di nuovi metodi di deposizione
- **Università degli Studi di Parma (ThiFi-Lab):** realizzazione celle solari a film sottili policristallini ad alta efficienza caratterizzate dal diverso materiale assorbitore e celle solari a film sottili basate su $Cu(In,Ga)Se_2$ e/o $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$ su piastrelle ceramiche di tipo commerciale per l'uso in facciate ventilate in edifici a impatto energetico vicino a zero
- **Università degli Studi di Pavia:** tecniche avanzate di intrappolamento luminoso e di concentrazione della luce solare per incrementare l'efficienza di celle solari a film sottile basate sul silicio
- **Università degli Studi di Torino:** sintesi e applicazione di coloranti di tipo squarainico per celle solari DSSC e realizzazione di dispositivi basati sul principio del "relay" elettronico a base di coloranti organici e quantum dots inorganici
- **Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" / Center for Hybrid and Organic Solar Energy (C.H.O.S.E.):** realizzazione e ottimizzazione di dispositivi fotovoltaici basati su le tecnologie emergenti; scale-up dei dispositivi di tipo DSSC e PSC con realizzazione di sub-moduli e moduli di varie dimensioni; test di efficienza e durata in condizioni controllate e in ambiente rilevante d'utilizzo
- **Università degli Studi di Ferrara:** sviluppo di nuove coppie redox basate su complessi di metalli di transizione per rimpiazzare lo iodio in celle DSSC; studio sui composti organici come conduttori di lacune per celle solari a perovskiti
- **Università degli Studi di Bari "A. Moro":** sviluppo di metodi catalitici per materiali π -coniugati (oligomeri e polimeri), anche per utilizzo in celle solari organiche; studio di sistemi ibridi bio-organici e processi di trasferimento elettronico ed energetico
- **Istituto ENI Donegani** di Novara: lavora da tempo allo sviluppo dell'intera filiera produttiva del fotovoltaico di nuova generazione a base di semiconduttori organici, in particolare: modellazione quantomeccanica delle molecole fotoattive, sintesi e caratterizzazione dei polimeri e dei derivati fullerenici, formulazione degli inchiostri e loro deposizione, studio della risposta dei moduli fotovoltaici alle varie frequenze luminose incidenti e valutazione della loro efficienza elettrica, costruzione di prototipi di celle solari funzionanti e loro caratterizzazione morfologica
- **Eurac Research** – Bolzano: centro di ricerca privato composto da 11 istituti fra cui quello sulle Energie rinnovabili.

BEST PRACTICES

Esempi di best practices di installazioni fotovoltaiche in Italia sono riscontrabili già dall'inizio degli anni '80:

- 1981 impianto FV di ENEL ($P_n = 1$ kWp, Misterbianco, Catania, 1981), per l'alimentazione di un'utenza familiare
- 1984 impianto FV da 80 kW di Vulcano, realizzato da ENEL nell'ambito di un progetto dimostrativo europeo e tuttora in esercizio
- 1986 impianto ENEA DELPHOS sezione 1, da 300 kWp con aggiunta nel 1991 della Sezione 2, con 3 plugs da 100 kWp per un totale di 600 kWp
- 1993 impianti di generazione a supporto della rete di MT, realizzati da ENEL (Serre Persano 3,3 MW) e ENEA (PLUG 100 kW)
- 1999 impianto FV da 1 MW a Herne in Baviera (il primo grande impianto realizzato con inverter di stringa: 600 unità da 1,5 kW)
- 2001 impianto FV da 1 MW sul tetto della fiera di Monaco di Baviera (il primo impianto realizzato con inverter da 1 MW)
- 2010 impianto Montalto di Castro (Viterbo) da 84 MW (il più grande in Italia)
- 2011 impianto Solarpark da 168 MW a Senftenberg (Germania)
- 2011 impianto FV sul tetto dell'interporto di Padova, potenza complessiva 13 MW (il più grande "tetto fotovoltaico" in Europa insieme all'impianto Loghadden in Belgio)
- 2014 impianti su tetti delle costruzioni con rimozione dell'amianto
- 2015 impianto FV Cestas da 300 MW realizzato in Francia è attualmente il più grande in Europa (<http://www.pvresources.com/>)
- 2015 impianto Solar Star Projects da 575 MW negli USA
- 2015 Longyangxia Dam Solar Park da 850 MW in Cina (attualmente il più grande al mondo)
- il più grande impianto fotovoltaico d'Europa basato sulla tecnologia dei film sottili si trova a Templin (Germania): esso è costituito da ca. 1.5 milioni di moduli a CdTe prodotti dall'azienda tedesca Belectric, e distribuiti su 214 ettari. La potenza nominale dell'impianto è di 128.5 MWp
- impianto fotovoltaico del centro congressi della École Polytechnique Fédérale di Losanna (EPFL, Svizzera): data di entrata in servizio Aprile 2014, moduli DSSC di vari colori, superficie totale 300 m². Unico impianto al mondo di dimensioni notevoli basato sulla tecnologia DSSC. Rappresenta un significativo esempio di integrazione architettonica dal momento che i pannelli DSSC, invece di essere posti sul tetto, costituiscono una vetrata policroma posta su una delle facciate dell'edificio [12-13]
- la città austriaca di Graz sta realizzando una "Science Tower", dell'altezza progettata di 60 m, che dovrà contenere un incubatore per le aziende guidate da giovani imprenditori impegnati nel settore delle energie rinnovabili. La superficie esterna della torre sarà in parte ricoperta da moduli DSSC che ne assicureranno l'approvvigionamento energetico [14]
- ci sono in Italia attualmente 86 impianti utility-scale (sopra 10 MW), il più grande da circa 85 MW è quello di Montalto di Castro.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- [1] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, H. Pettersson, *Chem. Rev.* 2010, 110, 6595
- [2] *Organic Solar Cells: Materials, Devices, Interfaces, and Modeling* (Ed.: Q. Qiao), CRC Press, Boca Raton, 2015.
- [3] S. Kazim, M. K. Nazeeruddin, M. Grätzel, S. Ahmad, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2014, 53, 2812
- [4] P. V. Kamat, *J. Phys. Chem. C* 2008, 112, 18737.
- [5] IEA PVPS - Trends in Photovoltaic Applications - 2015 - Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2014, 20th Edition (link)
- [6] Photovoltaics Report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Friburgo, Germania, Agosto 2015: <http://www.ise.fraunhofer.de/en/downloads-englisch/pdf-files-englisch/photovoltaics-report-slides.pdf>.
- [7] IEA PVPS - National Survey Report of PV Power Applications in ITALY in 2014, 15 October 2015– 2015 (link)
- [8] Terna - Rapporto mensile sul sistema elettrico consuntivo Dicembre 2015
- [9] Logitech Solar Keyboard Folio™: <http://gcell.com/case-studies/wireless-solar-keyboard>.
- [10] Gestore dei Servizi Energetici (GSE), Rapporto Statistico Energia da Fonti Rinnovabili Anno 2014, Dicembre 2015: <http://www.gse.it/it/Statistiche/RapportiStatistici/Pagine/default.aspx>
- [11] Gestore dei Servizi Energetici (GSE), Rapporto Statistico 2014 Solare Fotovoltaico, Dicembre 2015: <http://www.gse.it/it/Statistiche/RapportiStatistici/Pagine/default.aspx>
- [12] E. Barraud, *Chimia* 2013, 67, 181
- [13] <https://actu.epfl.ch/news/epfl-s-campus-has-the-world-s-first-solar-window/>
- [14] <http://www.smartcitygraz.at/moretext-was-ist-der-science-tower-forschungsturm/>
- [15] D. Jordan, S. Kurts, "Photovoltaic Degradation Rates – An Analytical Review", NREL/JA-5200-51664, June 2012
- [16] RSE - Monografia I sistemi di generazione fotovoltaica: La tecnologia e gli effetti sul sistema elettrico nazionale, 2016
- [17] National Renewable Energy Laboratory: www.nrel.gov/analysis/sustain_lca_pv.html
- [18] H. C. Kim, V. Fthenakis, J.-K. Choi, D. E. Turney, *J. Ind. Ecol.* 2012, 16, S110.
- [19] R. García-Valverde, J. A. Cherni, A. Urbina, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2010, 18, 535.
- [20] N. Espinosa, R. García-Valverde, A. Urbina, F. C. Krebs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cell* 2011, 95, 1293.
- [21] M. L. Parisi, S. Maranghi, R. Basosi, *Renew. Sust. Energy Rev.* 2014, 39, 124
- [22] IEA PVPS Task 13 - Analysis of Long-Term Performance of PV Systems-- November 2014 - link
- [23] D. Bertani, S. Guastella, 2015, Analisi qualitativa del funzionamento di componenti fotovoltaici innovativi e di differenti tipologie di impianti installati in vari siti italiani, RSE, Ricerca di Sistema, Rapporto 15000243
- [24] Energy&Strategy Group - Renewable Energy Report - 19 Maggio 2015