

● rinnovabili / fotovoltaico



di Roberto Napoli (*) e Filippo Spertino (**)



Per la transizione energetica ha oggi un ruolo fondamentale la produzione di energia elettrica tramite celle fotovoltaiche, basate su sottili lamine di un semiconduttore molto noto nell'elettronica, il silicio cristallino. Negli ultimi anni, il fotovoltaico (PV in inglese, FV in italiano) si è guadagnato il primo posto mondiale per le nuove installazioni di generazione elettrica, superando le fonti fossili di vario tipo (carbone, gas, petrolio), le nucleari a fissione e le altre risorse rinnovabili (da quelle sfruttate già da lungo tempo, come l'idroelettrico a quelle

di recente sfruttamento, come la fonte eolica).

Vale dunque la pena analizzare lo stato attuale e le prospettive più credibili.

La storia delle celle fotovoltaiche inizia nel 1839 quando, nel corso di esperimenti su celle elettrolitiche, lo scienziato francese Alexandre-Edmond Becquerel (da non confondere col più famoso figlio, Antoine Henri) a soli 19 anni si rese conto che la tensione della batteria era maggiore se gli elettrodi venivano esposti alla luce solare. La scoperta di questo lega-

me fra l'illuminazione e la generazione di energia elettrica portò poi alla prima cella fotovoltaica al silicio (1877), capace di generare elettricità con un rendimento dell'1 per cento.

Le basi teoriche del fenomeno fotovoltaico furono chiarite per la prima volta da Albert Einstein con la pubblicazione *On a Heuristic Viewpoint concerning the Production and Transformation of Light* (1905), che gli valse poi il premio Nobel anni dopo, nel 1921.

Le applicazioni industriali cominciarono a svilupparsi dopo

(*) Professore Emerito di Sistemi Elettrici, Politecnico di Torino, Consigliere dell'Ordine degli Ingegneri Torino

(**) Ordinario di Generazione fotovoltaica ed eolica, Politecnico di Torino, Dipartimento Energia

Se i numeri relativi alla potenza installata a livello mondiale sono lusinghieri, i dati riguardanti l'energia elettrica prodotta non lo sono altrettanto, per la nota intermittenza della radiazione solare

la Seconda guerra mondiale. Un forte impulso derivò dalla ricerca spaziale, che portò alla prima cella fotovoltaica a bordo del satellite Vanguard 1 (1958). Poi lo sviluppo ha assunto connotati sempre più tumultuosi, con il costante incremento dei sistemi fotovoltaici e della loro potenza. La potenza nominale (detta anche capacità) di un sistema fotovoltaico (GWp, gigawatt di picco) si intende pari alla somma delle potenze nominali delle singole celle, considerate sottoposte a un'irradiazione di riferimento corrispondente al cielo sereno nelle ore centrali della giornata soleggiata.

La capacità fotovoltaica installata nel mondo supera ormai un terawatt di picco (1.163,7 GWp nel 2022). L'incremento annuale negli ultimi anni è stato dell'ordine del 22-23 per cento (circa 200 GWp/anno).

Nel 2022 le aree geografiche che spiccano sono l'Asia-Pacifico (Cina 415 GWp, Giappone 85 GWp, India 79 GWp), l'Europa (209 GWp), gli USA (142 GWp), il Brasile (24 GWp), l'Australia (30 GWp). L'Italia figura dignitosamente con 29 GWp.

Nel 2023 la capacità fotovoltaica globale si è chiusa con un aumento record del 43 per cento (413 GWp). Le previsioni per il 2030 sono ancora più sostanziose: 800-1.200 GWp/anno secondo diversi scenari ipotizzati (IEA Energy Outlook 2023). Si prevede che entro la fine del decennio le energie rinnovabili contribuiranno per l'80 per cento alla nuova capacità di produzione elettrica e la metà di questo incremento sarà dovuto alla

produzione fotovoltaica.

Se i numeri relativi alla potenza installata a livello mondiale sono lusinghieri, i dati riguardanti l'energia elettrica prodotta non lo sono altrettanto, per la nota intermittenza della radiazione solare. La producibilità fotovoltaica dipende dalla radiazione solare incidente, dall'orientamento e inclinazione dei moduli, dalla pulizia delle celle, dalle prestazioni tecniche dei componenti e, in ultimo, anche dalla temperatura. Il fattore di capacità (*capacity factor*) è il parametro che dà la percentuale di tempo di funzionamento alla potenza nominale rispetto alle 8.760 ore dell'anno. Il *capacity factor* di una centrale termoelettrica convenzionale può essere anche superiore all'80 per cento.

I sistemi fotovoltaici hanno ovviamente valori tipici molto mi-

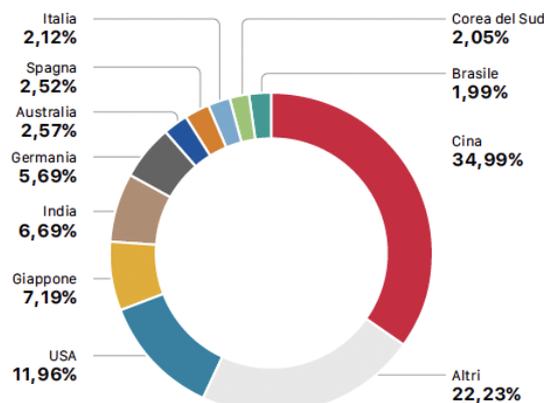
nori, che in Italia variano da Nord (10-18 per cento) a Sud (18-20 per cento). Valori maggiori (anche 27 per cento) possono essere raggiunti con impianti a orientamento variabile, con inseguimento del percorso solare. Tanto per dare un ordine di grandezza, un sistema fotovoltaico da 1 kWp potrebbe produrre tipicamente fra 1.000 e 1.500 kWh l'anno.

L'energia elettrica prodotta da fotovoltaico è passata nel mondo da 147 TWh nel 2020 a 270 TWh nel 2022 - il 7,4 per cento dell'elettricità prodotta globalmente - con un aumento di oltre l'80 per cento. Anche nel nostro Paese la produzione fotovoltaica è cresciuta significativamente, arrivando nel 2022 a circa il 10 per cento della generazione elettrica italiana, con 27,5 TWh.

Al forte aumento hanno contribuito certamente la riduzione dei costi ma anche l'indiscutibile e generalizzato favore dell'opinione pubblica, a differenza di quanto accade per tutti gli altri tipi di generazione. Una crescita così robusta finisce naturalmente

Figura 1 Quota percentuale della capacità fotovoltaica nominale, 2022

Fonte: IEA



La tecnologia dominante per le celle fotovoltaiche si basa sul silicio, con un degrado limitato (0,5 per cento/anno) e una durata di vita notevole (garanzia tipica di 30 anni). Le tecnologie dei film sottili - tellururo di cadmio e perovskiti - presentano degradazione e durata non ancora accettabili (oltre il 20 per cento in meno di un anno)

con generare problemi geopolitici sulla disponibilità dei materiali semiconduttori e sull'innovazione tecnologica. Oggi la Cina domina il settore con l'80 per cento della capacità produttiva mondiale, con una supremazia tecnico-economica in aumento e sin qui difficilmente scalfibile.

Per le celle fotovoltaiche la tecnologia dominante (90 per cento) si basa sul silicio: monocristallino, più efficiente ma più costoso, e poli-cristallino, meno efficiente ma meno costoso. Il silicio è abbondante in natura ma il suo trattamento per la produzione di celle è energivoro e tecnologicamente avanzato. Le celle al silicio hanno un degrado limitato (0,5 per cento/

anno) e una durata di vita notevole (garanzia tipica di 30 anni).

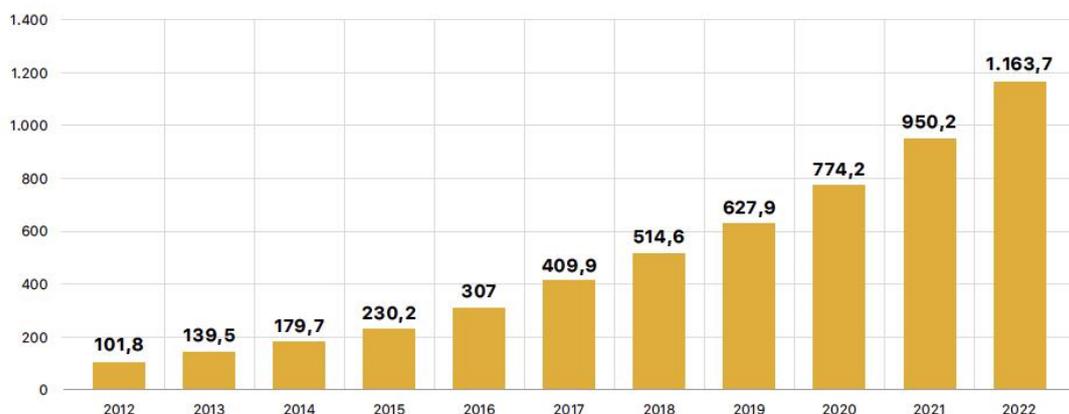
Le altre tecnologie, che non arrivano a coprire il 10 per cento del mercato globale, sono quelle dei film sottili (spessori ancora minori del silicio cristallino, che arrivano fino al micrometro). In particolare, il tellururo di cadmio ha già un suo spazio in commercio. Negli ultimi anni è cresciuto l'interesse di ricerca per le perovskiti, perché raggiungono le efficienze del silicio monocristallino, sono relativamente economiche e consentono anche di produrre celle flessibili. Tuttavia la degradazione e la durata non sono ancora accettabili (rispetto al silicio, oltre il 20 per cento in meno di un anno).



La ricerca è comunque in continua evoluzione. Un settore promettente è quello delle nanotecnologie, che consentono di produrre materiali non esistenti in natura e appositamente progettati per ottenere caratteristiche particolari. Diverse speranze sono riposte nel grafene.

Il potenziale produttivo foto-

Figura 2 Evoluzione mondiale della capacità fotovoltaica installata (GW)





sophistic/1252516/Adobe Stock

voltaico è enorme, essendo enorme l'energia proiettata dal sole sulla Terra. Nel passato i sistemi fotovoltaici erano prevalentemente costituiti da grandi impianti al suolo. Oggi, con la penetrazione della generazione distribuita nei centri urbani, aumentano le installazioni sui tetti degli edifici, che sono ormai (2022) quantitativamente pari alle installazioni a terra.

Le celle fotovoltaiche generano energia elettrica in corrente continua. La tensione generata da una tipica cella fotovoltaica è di 0,6 V. Per aumentare la tensione finale, le celle sono poi combinate in stringhe, con collegamenti in serie e in parallelo. La tensione finale può raggiungere valori pericolosi per la sicurezza delle persone. Per fare manutenzione sulle celle occorre quindi oscurarle, in modo da azzerare la tensione ai morsetti.

I sistemi fotovoltaici comprendono, oltre alle celle, gli invertitori (*inverter*) per trasformare la corrente continua in corrente alternata a frequenza industriale.

Gli attuali costi vivi di un siste-

Il fenomeno fotovoltaico tra presente e futuro

Per chi deve decidere su quale impianto investire per produrre energia elettrica, è certamente interessante il confronto fra i costi delle varie soluzioni. I parametri più usati sono LCOE (Levelized Cost of Electricity) e LCOS (Levelized Cost Of Storage). LCOE indica il valore medio (dollari/kWh) del costo dell'elettricità prodotta durante la sua vita utile da un impianto alimentato da una determinata fonte, tenuto conto dei costi totali di installazione, gestione e smaltimento. In pratica LCOE è pari al rapporto fra il costo totale dell'impianto e la produzione totale durante il ciclo di vita. Allo stesso modo LCOS (dollari/kWh) si riferisce all'energia trasferita dall'impianto di accumulo.

La tabella riporta i parametri LCOE e LCOS per impianti che entreranno in funzione nel 2027 (EIA, U.S. Energy Information Administration, 2022). Per impianti che entreranno in funzione nel 2040 le previsioni sono praticamente le stesse.

Impianto	dollari 2021/MWh
<i>Programmabile (LCOE)</i>	
Carbone aggiornato	79,46
Ciclo combinato	44,05
Nucleare aggiornato	85,28
Geotermico	41,01
Biomasse	86,53
<i>Aleatorio (LCOE)</i>	
Eolico onshore	40,08
Eolico offshore	98,01
Solare	33,42
Idroelettrico	64,27
<i>Accumulo (LCOS)</i>	
Batterie	120,47

ma fotovoltaico (incluso celle, inverter, cavi, strutture di supporto e accessori vari) variano fra 800 e 2.000 euro/kWp. Aggiungendo gli altri oneri di installazione, un impianto da 6 kWp oggi (2024) è quotato sul mercato fra 14.000 e 16.000 euro. Le spese annuali per il funzionamento e la manutenzione sono normalmente molto contenute, valutabili tra 1 e 2 per cento del costo di installazione.

Le problematiche della transizione ecologica e la ricerca di una maggiore indipendenza energetica portano ad assegnare un'elevata priorità all'installazione di sistemi

fotovoltaici. Per favorire questo tipo di investimenti lo Stato mette a disposizione diversi incentivi, in particolare con le disposizioni sulle Comunità energetiche rinnovabili e sui Raggruppamenti per l'autoconsumo.

Questi incentivi (ventennali) prevedono la garanzia di un ritiro dedicato dell'energia eventualmente prodotta in eccesso, a prezzi stabiliti dal regolatore. Per favorire lo spostamento dei consumi nelle ore di produzione sono previsti compensi (premi) per il cosiddetto autoconsumo. Sono poi possibili detrazioni fiscali, pari al 50 per

cento delle spese di installazione, con recupero in 10 anni.

Con gli attuali prezzi dell'energia elettrica (da 100 a 200 euro/MWh, secondo i dati del GME, Gestore Mercati Energetici) e con gli incentivi previsti, mediamente chi ha installato un impianto FV rientra nel proprio investimento in 7-10 anni e poi, tenuto conto della durata delle celle, ha fino a 20 anni di attivo.

È molto importante una progettazione accurata dell'impianto che tenga conto sia dei profili di carico sia delle circostanze installative (buona esposizione tra Sud/Est e Sud/Ovest, tipicamente con 15°-30° di inclinazione).

Per un cliente residenziale (nucleo di 2-4 persone) l'impianto FV deve essere dimensionato al più per il fabbisogno energetico annuale (2.000-4.000 kWh), per evitare eccessivi esuberi nei mesi estivi.

L'aleatorietà della produzione fotovoltaica e una migliore resilienza del servizio fanno subito venire in mente le batterie, che però hanno ancora un costo poco favorevole (attualmente stimabile in 400-800 euro/kWh) ma destinato a ridursi.

Le batterie per gli impianti FV (al litio, con elettrodo in litio ferro-fosfato) sono diverse da quelle per le auto elettriche e per la telefonia cellulare (più compatte e costose). Le batterie più economiche sono quelle al piombo-acido, con bassa capacità e durata di vita limitata. Esiste una variante migliore al gel. Decisamente migliori (e anche molto più costose) sono le batterie agli ioni di litio, con la variante al litio-ferro-fosfato per maggiore sicurezza ambientale contro gas tossici e pericolo di esplosione. Anche sulle batterie il predominio tecnologico ed economico della Cina è difficilmente scalfibile (65 per cento della produzione mondiale).

Le interazioni fra l'impianto FV e l'infrastruttura di distribuzione presentano diversi aspetti interes-

santi, a beneficio sia della rete sia dell'utente.

Come noto, per mantenere costante la frequenza l'elettricità prodotta deve essere eguale nello stesso momento a quella consumata (più le perdite). Il carico varia in continuazione, ma l'energia cinetica delle centrali di produzione è tale da potere fare fronte istantaneamente alle variazioni, dando tempo ai sistemi di controllo di intervenire adeguatamente entro pochi minuti per mantenere pressoché costante la frequenza di rete.

Questa situazione è adesso modificata, perché accanto alle variazioni di carico occorre anche tenere conto delle variazioni della produzione fotovoltaica, dovute alle variazioni del livello di irra-

dianza solare, con tempi dell'ordine del minuto.

Per mantenere in equilibrio il sistema, il gestore della rete di trasmissione (in Italia, Terna) deve quindi prevedere adeguati interventi, coinvolgendo gli attori della generazione distribuita. La tecnica più semplice prevede che il gestore possa comandare il distacco selettivo della produzione fotovoltaica. Gli studi e le esperienze sin qui accumulate fanno ritenere che questi interventi selettivi di distacco possano essere effettuati abbastanza agevolmente sinché la produzione fotovoltaica non supera il 20-25 per cento di quella totale.

Poiché attualmente la produzione fotovoltaica è dell'ordine del 10 per cento, si può ritenere che



esista ancora un margine sufficiente di espansione della generazione distribuita senza andare a sbattere contro la necessità di potenziare le reti di trasmissione e distribuzione, salvo naturalmente eliminare gli eventuali colli di bottiglia.

L'entrata in scena delle auto elettriche apre anche la prospettiva interessante di utilizzare le batterie della auto come sorgente di soccorso (V2G, *Vehicle to Grid*).

Ma quali sono le prospettive della tecnologia fotovoltaica nei prossimi anni?

Come materiali, il silicio cristallino continuerà a mantenere una posizione dominante. L'efficienza delle celle, (attualmente 18-20 per cento) potrà avvicinarsi al 30 per cento. Grosso modo, ba-



Le interazioni fra l'impianto FV e l'infrastruttura di distribuzione presentano diversi aspetti interessanti, a beneficio sia della rete sia dell'utente. Per mantenere costante la frequenza, l'elettricità prodotta deve essere eguale nello stesso momento a quella consumata

sterà quindi una superficie di poco più di 3 m² per installare una potenza elettrica nominale di 1 kWp.

Oltre agli impianti sui tetti e a terra, guadagneranno maggiore spazio anche altre applicazioni quali:

- Impianti flottanti (*Floating PV, FPV*), con moduli posati su zattere galleggianti su specchi d'acqua (anche di bacini idroelettrici), con vantaggi sia sull'efficienza dei moduli (per il raffreddamento operato dall'acqua) sia sui bacini (per la minore evaporazione);
- Impianti agrivoltaici, con moduli su terreni agricoli, installati a un'altezza sufficiente da non penalizzare le colture agricole sottostanti;
- Micro-reti intelligenti, con combinazione di celle fotovoltaiche, sistemi di accumulo e pompe di calore che consente di assicurare un servizio elettrico accettabile anche con accumuli dimensionati per uno o due giorni di autonomia in assenza di sole, portando l'autosufficienza a livelli del 70-85 per cento (come dimostrato da esperienze nel laboratorio sperimentale del Politecnico di Torino PVZEN);
- Flessibilizzazione della domanda, ossia la gestione dei profili di consumo dei carichi per sfruttare al meglio la produzione fotovoltaica e ridurre le congestioni causate da insufficiente capacità delle linee;
- Espansione degli accumuli, investendo sugli accumuli

idraulici in affiancamento agli accumuli chimici (batterie). In questi accumuli idraulici l'Italia ha fatto da pioniere con gli impianti di pompaggio, che già oggi hanno una potenza operativa di circa 6 GW, poco utilizzata per effetto di distorsioni del mercato. La redditività degli impianti di pompaggio si basava sulla differenza fra il minor valore dell'energia nelle ore notturne e quello maggiore delle ore diurne. Oggi questa differenza si è invertita, per cui gli impianti di pompaggio hanno una minore attrattività economica. Occorre rivedere i postulati di mercato per dare adeguato valore economico ai servizi ancillari di ausilio alle dinamiche di rete.

È ovvio l'interesse dell'Italia a favorire in tutti i modi la produzione fotovoltaica. Meno ovvi e giustificabili sono i ritardi sin qui accumulati. Dopo un lunghissimo transitorio, è finalmente entrato in vigore il decreto sulle Comunità energetiche rinnovabili e sui gruppi di Autoconsumo. Le criticità non mancano. Ci sarà il cambio di passo necessario? Difficile a dirsi. Non resta che sperare e stare a vedere.

PVZEN (PhotoVoltaic Zero Energy Network), il laboratorio sperimentale per le comunità energetiche del Politecnico di Torino

