

La conversione dell'energia solare in energia elettrica, in una forma utilizzabile per gli usi domestici o industriali, è un processo complesso che richiede la sovrapposizione e l'interazione di molte competenze diverse, che comprendono la fisica dei semiconduttori e dei dispositivi elettronici, l'elettronica circuitale e di potenza, gli impianti elettrici e le relative normative, gli aspetti economici e legislativi. La vastità delle conoscenze necessarie per guardare in maniera unitaria l'intero settore fa sì che sia difficile trovare testi che presentino in maniera organica tutti gli aspetti legati alla produzione di energia elettrica da fonte solare. D'altro canto, è convinzione di chi scrive che una visione parziale, per quanto specialistica, di una sola parte della filiera produttiva non consenta di cogliere appieno i limiti e le opportunità che ci sono offerte. Partendo da tali premesse questo libro si propone l'obiettivo di presentare, con un grado di approfondimento di livello universitario, i molteplici aspetti della tecnologia fotovoltaica legati da un unico filo logico che, partendo dalle proprietà della luce solare e dei semiconduttori, conduce alla pratica fruibilità dell'energia elettrica prodotta.

A questo scopo il testo si articola in tre macroaree. Nella prima vengono trattati gli aspetti legati alla fisica delle celle solari, partendo dalle celle di prima generazione (quelle basate sul silicio cristallino), per passare a quelle di seconda generazione (film sottile) e di terza generazione (multigiunzione per concentrazione) con un accenno doveroso alle celle organiche. Nella seconda la cella solare viene vista come componente elementare di un pannello solare e l'approccio diventa di tipo circuitale per poter descrivere a livello di sistema il comportamento di un campo fotovoltaico comunque esteso. In questa sezione vengono anche introdotti i criteri di dimensionamento di un campo fotovoltaico, con l'analisi dei problemi che possono nascere da scelte improprie o da condizioni di funzionamento particolari, e gli aspetti legati alla qualificazione e certificazione dei pannelli solari. La terza macroarea, infine è dedicata alla descrizione dei sistemi elettronici per l'interfacciamento con la rete elettrica (*inverter*).

Prima di entrare nel vivo degli argomenti si ritiene utile una breve digressione di carattere generale che aiuta a collocare le tematiche trattate nel più ampio panorama delle fonti di produzione dell'energia elettrica di qualsiasi natura.

Non vi è dubbio che il momento nel quale questo libro viene pubblicato sia un momento fortunato per l'energia fotovoltaica. Hanno, infatti, perso consistenza alcuni radicati luoghi comuni. Non più di dieci anni fa era opinione diffusa che questa fonte di energia avrebbe sempre avuto un ruolo marginale rispetto alle enormi esigenze energetiche delle società industrializzate. Se si guarda al bilancio energetico del 2013 (www.terna.it) si scopre che i quasi 600000 impianti fotovoltaici italiani hanno prodotto più di 21 TWh (TeraWattora) di energia elettrica, pari a circa l'8% della produzione energetica complessiva. Un valore talmente grande che sarebbe ormai impensabile farne a meno (equivalente alla produzione di circa due centrali nucleari da 1 GigaWatt). Se si considera che nel 2010, con 1.9 TWh prodotti, l'incidenza del fotovoltaico era pari allo 0.6% del totale (www.GSE.it), si comprende come, in appena 3 anni, l'Italia sia stata protagonista di una rivoluzione silenziosa che l'ha portata ad essere il secondo produttore mondiale alle spalle della sola Germania.

Il secondo luogo comune di cui è vittima la produzione di energia fotovoltaica è che si tratti di un sistema eccessivamente costoso, il cui sviluppo è legato esclusivamente alla presenza di generosi incentivi statali (*feed in tariff*) che compensano e in più remunerano la differenza di prezzo rispetto alle fonti di produzione tradizionali. Ancora da fonti autorevoli (www.epia.it) apprendiamo che nel 2013 in Italia si è raggiunta la *grid parity*, cioè la parità di costo per l'utente finale dell'energia autoprodotta e di quella acquistata dalla rete elettrica (è stato coniato il termine *prosumer* per indicare un soggetto che sia contemporaneamente produttore e consumatore di energia); mentre è attesa per la fine del 2014 la *fuel parity*, cioè la parità di costo rispetto ad altri combustibili e quindi la convenienza per un soggetto industriale ad investire nella realizzazione di una centrale elettrica fotovoltaica piuttosto che in una tradizionale¹.

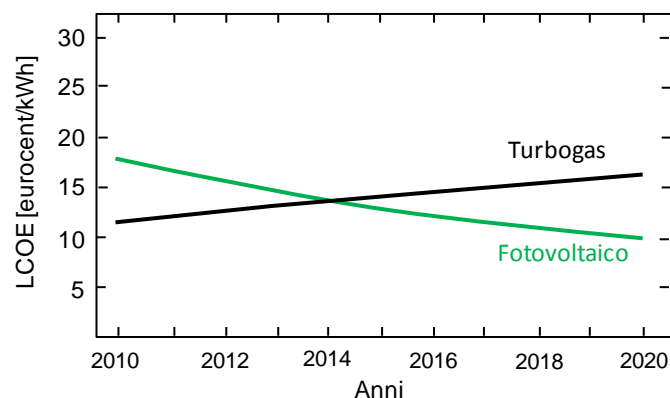
Il concetto di *fuel parity* implica un confronto tra i costi di produzione dell'energia da fonte fotovoltaica o tradizionale. Onestà intellettuale vuole che si sottolinei come il calcolo di tali costi sia fortemente influenzato dai valori che, in maniera più o meno arbitraria, vengono attribuiti ai parametri dei modelli utilizzati. La definizione del costo, infatti, è meno banale di quanto si possa pensare in quanto deve tenere conto di tutti quei fattori che incidono su di esso nell'arco dell'intero ciclo di vita di un impianto, dall'investimento iniziale allo smaltimento a fine vita.

¹ Il rapporto "Solar Photovoltaic competing in the energy sector", cui si fa riferimento, confronta la produzione di energia fotovoltaica con le centrali a turbogas.

Per standardizzare il confronto tra fonti di energia diverse si utilizza il concetto di “costo livellato dell’energia” o **LCOE** (*Levelized Cost of Energy*) definito come

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{1 + r^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{1 + r^t}}$$

In questa espressione n rappresenta il numero di anni di vita dell’impianto di produzione, I_t rappresenta l’investimento per la realizzazione dell’impianto (potrebbe essere diverso da zero solo il primo anno oppure rappresentare la rata annua di restituzione di un finanziamento o, ancora, prevedere il costo di sostituzioni programmate di parti dell’impianto), M_t rappresenta i costi annui di manutenzione (in aggiunta alla manutenzione ordinaria potrebbe contenere il costo dello smaltimento finale dei pannelli, nel caso di un impianto fotovoltaico, oppure delle scorie radioattive nel caso di una centrale nucleare), F_t rappresenta il costo del combustibile (nel caso di un impianto fotovoltaico questo termine è uguale a zero mentre rappresenta una voce preponderante per un impianto alimentato da combustibile fossile), r rappresenta il tasso di sconto o costo del denaro (necessario per attualizzare il valore dei costi e dei ricavi), E_t rappresenta l’energia prodotta. È abbastanza chiaro come LCOE rappresenti il rapporto tra i costi totali sostenuti e la corrispondente energia ricavata e viene, pertanto, espresso in euro/kWh. Il suo valore dipende dalle ipotesi che si fanno sul ciclo di vita (è evidente che per un impianto fotovoltaico il risultato è completamente diverso se si prevede una vita utile di 25 anni oppure di 40 anni), sui costi di manutenzione, sull’energia prodotta anche a molti anni dall’installazione etc. Anche tenendo presenti questi limiti è indubbio che il LCOE dell’energia fotovoltaica sia costantemente diminuito nel corso degli anni. La figura seguente mostra l’andamento di tale indice negli anni passati e la previsione per il futuro, sia per l’energia fotovoltaica che per quella prodotta da centrali a turbo gas.

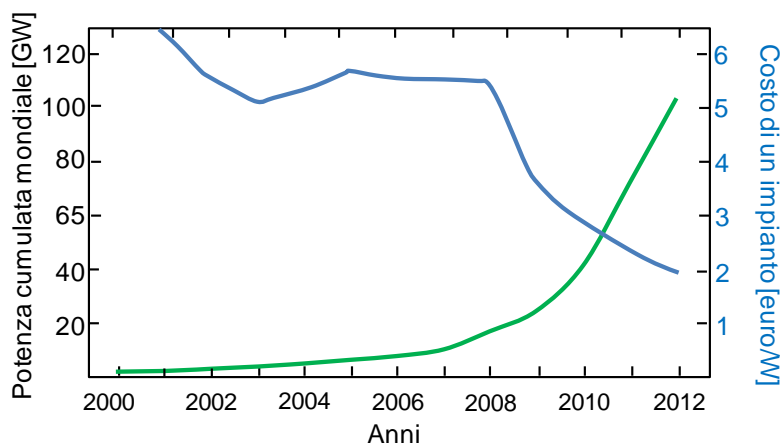


Come si può vedere a partire dal 2014 si prevede che, in Italia, il costo di produzione da fotovoltaico diventi inferiore a quello di una centrale turbo gas, mentre negli anni scorsi la competitività del fotovoltaico è stata garantita solo dalla presenza degli incentivi statali.

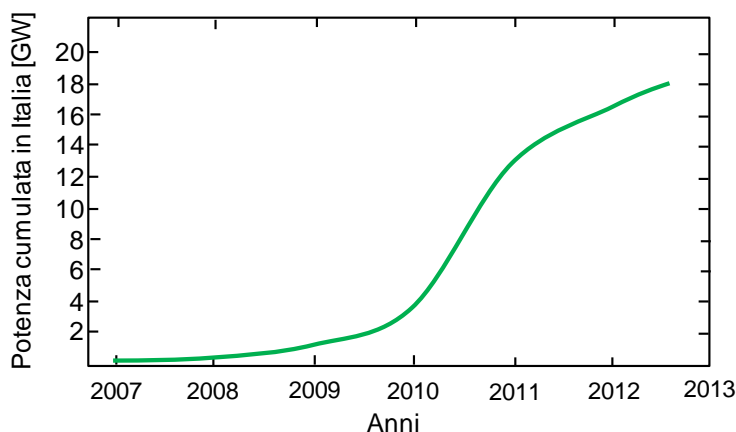
Va chiarito che il sistema degli incentivi ha interessato, nell’ultimo decennio, tutti i paesi industrializzati favorendo l’espandersi del fotovoltaico a livello globale, ciò ha fatto sì che la crescita del mercato non sia stata tanto legata alla normativa contingente di un singolo paese ma piuttosto ad un “clima favorevole” generalizzato, frutto della rinnovata attenzione ai temi ambientali ed alla crescente diffidenza verso l’energia nucleare. Questa considerazione è importante perché, come è noto, in Italia il regime incentivante si è esaurito nel luglio 2013, ciononostante ci si aspetta che il costo dei pannelli fotovoltaici, e di tutti gli altri componenti di un impianto fotovoltaico, continui a calare, per quanto ad un ritmo inferiore che in passato, grazie al mercato globale previsto comunque in crescita².

² Negli ultimi tre anni il mercato italiano ha avuto un’incidenza molto forte sul mercato globale arrivando a rappresentare anche il 50% del totale; la fine degli incentivi ha prodotto una contrazione delle installazioni in Italia che si sono ridotte dai 9 GW installati nel 2011 agli 1.4 GW del 2013. Questa riduzione è stata ampiamente bilanciata dalla

A titolo di esempio la figura seguente mostra la crescita della potenza cumulata degli impianti fotovoltaici nel mondo e la corrispondente diminuzione dei prezzi di un impianto completo (espressi in euro/W)



La figura mostra che alla fine del 2012 nel mondo risultano installati impianti fotovoltaici per una potenza complessiva superiore a 100 GW, di questi, circa 70 GW si trovano in Europa. Nel contesto europeo l'Italia si colloca, come già detto, al secondo posto, con più di 18 GW installati a fine 2013, con una crescita vertiginosa negli ultimi tre anni, come mostrato nella figura seguente³.



La fine degli incentivi porterà sicuramente una contrazione del mercato italiano che dovrà reggersi unicamente sulla raggiunta convenienza economica a lungo termine.

Da un punto di vista fisico, però, più che il costo è significativo un altro parametro prestazionale detto EROEI (Energy Return On Energy Investment), il quale rappresenta il rapporto tra l'energia prodotta nell'arco della vita utile da un dato sistema e l'energia spesa per realizzare il sistema stesso. È evidente che un sistema con EROEI minore di 1 non è energeticamente conveniente, dal momento che restituisce meno energia di quella impiegata per realizzarlo. Dovrebbe essere altrettanto evidente come sia estremamente complicato calcolare questo coefficiente perché nella valutazione dell'energia spesa si dovrebbe tenere conto anche, per esempio, dell'energia necessaria per costruire la fabbrica che realizza il sistema, nonché dell'energia necessaria per realizzare i materiali di cui è costituita la fabbrica e dell'energia

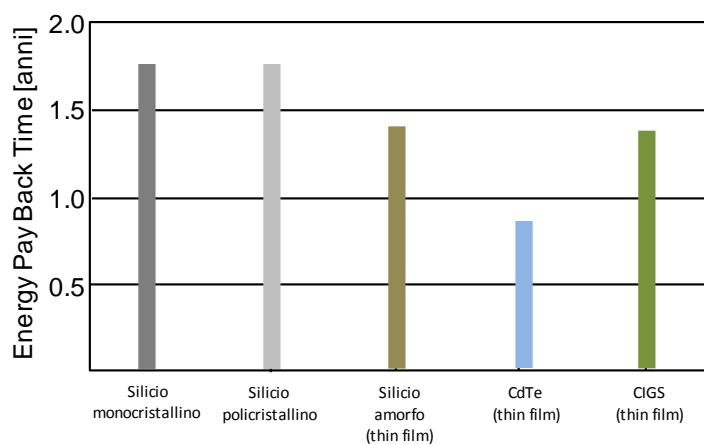
Cina (11.8 GW), la quale sta riversando sul mercato interno parte della sua sovracapacità produttiva, dal Giappone (6.9 GW) e dagli Stati Uniti (4.8 GW).

³ L'ente italiano di riferimento è il GSE, Gestore dei Servizi Elettrici; sul suo sito web, www.gse.it, tra le tante informazioni e report statistici sul mercato elettrico nazionale, si trova il "contatore fotovoltaico" che, continuamente aggiornato, tiene il conto del numero complessivo di impianti fotovoltaici installati in Italia e della potenza corrispondente. Un'altra applicazione, ATLASOLE, permette poi, al livello del singolo comune, di vedere il dettaglio di tutti gli impianti presenti in quel comune.

spesa dagli operai per raggiungere la fabbrica e così via. Per evitare scelte arbitrarie i metodi di calcolo di questo parametro sono standardizzati da norme ISO, cionostante i risultati che si trovano in letteratura sono diversissimi ed usati spesso in maniera ideologica per favorire o contrastare una determinata tecnologia (per esempio i sostenitori del nucleare ritengono che l'EROEI del fotovoltaico sia minore di 1, risultato che i sostenitori del fotovoltaico attribuiscono senza dubbio al nucleare)⁴.

Per quanto di difficile definizione non c'è dubbio che, almeno da un punto di vista concettuale, l'EROEI sia il vero parametro di merito che qualifica la sostenibilità a lungo termine delle tecnologie di produzione dell'energia. Strettamente legato al concetto di EROEI è il concetto di Energy Pay-Back Time (EPBT) il quale rappresenta il tempo necessario ad un dato sistema per restituire l'energia necessaria per realizzarlo. I due concetti condividono soltanto il calcolo dell'energia spesa perchè è evidente che l'EROEI dipende dal tempo di vita di sistema. In altri termini un determinato sistema potrebbe avere un EPBT basso ma un EROEI alto perchè, per esempio le sue prestazioni potrebbero degradare nel tempo.

Tenendo presenti le difficoltà di calcolo cui abbiamo accennato, a titolo di esempio, la figura seguente mostra una stima dell'EPBT per diverse tecnologie fotovoltaiche (per i motivi appena accennati si evita volutamente di riportare confronti con altre tecnologie) valutate dall'EPIA (European Photovoltaic Industry Association)



Dalla figura si vede che l'EPIA stima per i moduli fotovoltaici in silicio cristallino un EPBT di circa 1.8 anni. Considerando che la vita attesa per un impianto fotovoltaico è di almeno 30 anni questo significa che in prima approssimazione (considerando costante nel tempo la produzione di energia) l'EROEI corrispondente vale circa 16. Le tecnologie in film sottile sono caratterizzate da un EPBT più basso (grazie alla minore energia necessaria per la loro fabbricazione) ma in genere sono caratterizzate da un degrado più elevato rispetto al silicio e quindi da un EROEI complessivo inferiore.

Per concludere questa introduzione si può affermare che le considerazioni esposte inquadrano l'argomento di questo libro nel contesto di una tecnologia ormai matura e, al contempo, con un potenziale di ulteriore diffusione che al momento non vede limiti oggettivi. Le circostanze che hanno consentito un tale rapido sviluppo sono da ricercarsi nel circuito virtuoso che si è innescato tra incentivi all'installazione, che hanno portato alla nascita di un mercato molto vasto, e la diminuzione dei costi, anche energetici, conseguente alle economie di scala che si sono create.

Da questo momento in poi la scelta di installare un impianto fotovoltaico potrà essere una scelta dettata dalla convenienza economica ma anche la scelta culturale di chi vede nel sole l'unico vero futuro sostenibile.

⁴ L'EROEI di una tecnologia varia nel tempo, per esempio l'EROEI del petrolio era superiore a 100 all'inizio del 900, quando i giacimenti erano superficiali e poco sfruttati, mentre attualmente viene valutato in circa 10 a causa dell'incremento di energia richiesto per raggiungere giacimenti sempre più profondi).