

MARIO PAGLIARO, GIOVANNI PALMISANO, ROSARIA CIRIMINNA

IL NUOVO FOTOVOLTAICO



SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo e/o al testo allegato
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF6421

INDICE

<i>Ringraziamenti</i>	pag.	I
<i>Prefazione</i>	»	VII
Capitolo 1. VERSO LA RIVOLUZIONE DELL'ENERGIA SOLARE		
1.1. Celle solari flessibili	»	1
1.2. L'arrivo dell'era solare	»	6
1.3. Sfruttare e trasferire la luce solare	»	10
1.4. Tre ondate di innovazione	»	12
1.5. Solar Design	»	14
Capitolo 2. IL FOTOVOLTAICO		
2.1. Il funzionamento di una cella solare	»	23
2.2. La cella solare: un generatore di corrente	»	30
2.3. Limiti di efficienza nella conversione fotovoltaica	»	32
2.4. Celle a giunzione multipla	»	35
2.5. Applicazioni della cella solare	»	38
2.6. Breve storia del fotovoltaico moderno	»	43
Capitolo 3. CELLE SOLARI A FILM SOTTILE		
3.1. Film sottile: tecnologia FV del futuro prossimo	»	47
3.2. Moduli integrati e personalizzati	»	50
3.3. Celle in silicio amorfo (a-Si)	»	52
3.4. Celle al CIGS	»	56
3.5. Celle al CdTe	»	60
3.6. Celle al CIS	»	61
3.7. Questioni economiche ed ambientali	»	63
Capitolo 4. CELLE SOLARI POLIMERICHE		
4.1. Celle solari organiche	»	67
4.2. Celle solari a eterogiunzione	»	69
4.3. Celle in plastica a stampa	»	70
4.4. Power Plastic	»	73

Capitolo 5. CELLE SOLARI A COLORANTE

5.1. Celle a colorante: una tecnologia versatile	pag. 77
5.2. Principi di funzionamento delle DSC	» 81
5.3. Prestazioni delle celle solari a colorante	» 85
5.4. Integrazione architettonica (BIPV) delle DSC	» 87
5.5. Energia solare personalizzata	» 89

Capitolo 6. HELIONOMICS

6.1. Picco del petrolio e cambiamenti climatici	» 93
6.2. Energia solare. Ripagare persone e capitali	» 96
6.3. Il mercato dell'energia solare	» 99
6.4. Trend tecnologico del FV	» 103
6.5. Grandi piani solari	» 105
6.6. Ipotesi di un nuovo Manhattan Project	» 107

Capitolo 7. FOTOVOLTAICO IN ITALIA

7.1. Il boom del fotovoltaico in italia	» 113
7.2. Il Nuovo Conto Energia	» 118
7.3. Fotovoltaico, banche e ritorno dell'investimento	» 123
7.4. Prospettive industriali del fotovoltaico italiano	» 129

PREFAZIONE

Tetti di capannoni ricoperti da una guaina flessibile e facile da installare, isolante ma che fornisce preziosa energia elettrica; eleganti moduli semitrasparenti applicati in siti archeologici così da renderli energeticamente autosufficienti; vetri che, invece di dissipare la luce incidente come calore, la trasformano in energia elettrica; intere centrali fotovoltaiche “al film sottile” che generano introiti per milioni di euro ogni anno.

Sono queste solo alcune delle applicazioni delle nuove tecnologie fotovoltaiche (FV) descritte in questo libro che stanno rapidamente diffondendosi in tutta Italia a seguito dell'entrata in vigore degli incentivi per la produzione di elettricità solare e dell'innalzamento dei prezzi dell'energia elettrica.

Tre anni di prezzi del petrolio e del gas naturale su livelli storici sono stati sufficienti per assistere all'introduzione di una serie di nuove tecnologie rimaste dormienti nei cassetti dei laboratori accademici e industriali per oltre un ventennio.

E così l'industria globale del fotovoltaico da 12 miliardi di dollari che da tre anni cresce al tasso del 35% sta rapidamente passando alle tecnologie a “film sottile”: uno sviluppo paradossalmente previsto dallo stesso inventore della cella solare al silicio già nel lontano 1955. In breve, si tratta della prima grande evoluzione tecnologica nel settore fotovoltaico verso dispositivi (moduli) solari capaci di produrre elettricità a un costo paragonabile a quello dell'elettricità ottenuta bruciando il carbone, che è insieme la fonte energetica più inquinante e quella più economica fra quelle fossili.

Come la popolazione mondiale sta rapidamente apprendendo a proprie spese, i cambiamenti climatici dovuti all'attività umana sono una realtà che ha già colpito intere città (New Orleans) o aree (come l'Europa con temperature prossime ai 50°C nel giugno 2007).

Per ridurre le emissioni di CO₂ rapidamente l'unica soluzione è il passaggio alla generazione di energia dalle fonti rinnovabili, e primariamente dal sole.

In perfetto contrasto, attualmente per soddisfare i nostri bisogni energetici dipendiamo ancora da tecnologie inventate 100 o 150 anni fa, mentre nello stesso tempo tutti gli altri settori dell'industria si sono letteralmente reinventati.

A causa degli immensi profitti, infatti, l'intera industria energetica è stata particolarmente refrattaria ad operare qualsiasi cambiamento: le compagnie petrolifere non avevano alcun interesse ad investire in tecnologie alternative, e pressoché tutte le fonti energetiche alternative di cui oggi disponiamo – il solare, l'eolico e le stesse celle a combustibile – sono il risultato dell'innovazione accademica finanziata dagli Stati.

Oggi, non solo il prezzo del petrolio ha raggiunto e sorpassato i 120 dollari al barile, ma il ritorno energetico sull'energia investita (EROI) sta precipitando rapidamente, anche a causa delle maggiori difficoltà riscontrate nell'estrazione del petrolio, come per esempio sta accadendo in Kazakistan, dove l'Eni e le altre società consorziate dovranno eliminare le grandi quantità di gas solforato che ricopre l'immenso giacimento di Kashagan prima di poter avere accesso al petrolio.

Ed è esattamente questo *trend*, unito a quello del cambiamento climatico, che sta forzando la società globale a passare dalle energie fossili a quelle rinnovabili.

La buona notizia è che i nuovi moduli fotovoltaici sono pronti e sono entrati nel mercato nel corso degli ultimi due anni. E anche se al momento la loro efficienza è bassa, sono molte le ricerche in corso che produrranno considerevoli risultati entro pochi anni.

Nel frattempo, i moduli flessibili ultrasottili e quelli colorati già disponibili invaderanno le nostre città e la campagna producendo energia pulita in modo affidabile ed economico. Energia di cui potranno beneficiare anche quei due miliardi di persone che non hanno (e non avranno per molto tempo ancora) accesso ad una rete elettrica.

La rivoluzione dell'energia solare è iniziata. Vi partecipano alcuni fra i più importanti *venture capitalists* del mondo, alcuni Governi come quello tedesco e giapponese e, naturalmente, le compagnie petrolifere che, finalmente, hanno deciso di investire una parte dei loro immensi profitti in numerose *start up*, come Konarka negli USA, o direttamente presso i centri di ricerca pubblici più avanzati.

Analogamente, noi riteniamo che la finanza islamica giocherà un ruolo cruciale in questa transizione sia perché i *leader* di questi Paesi hanno la necessità di investire parte dei loro guadagni da gas e petrolio in fonti di energia alternativa; sia perché i principi della finanza islamica, ispirati dalla *Sharia*, incoraggiano investimenti eticamente responsabili, come quelli sull'energia solare.

Questo testo, dunque, fornisce al lettore una visione sintetica e aggiornata sulle nuove tecnologie fotovoltaiche e sulle loro applicazioni. Utilizzando uno stile conciso e numerose illustrazioni, il libro – il primo in Italia a trattare le nuove tecnologie FV – è focalizzato sugli aspetti pratici delle nuove tecnologie, contestualizzandole nel contesto italiano. Per ulteriori informazioni e per le attività formative che fanno da complemento al libro è possibile consultare il nostro sito www.qualitas1998.net.

Palermo, luglio 2008

Mario Pagliaro
Giovanni Palmisano
Rosaria Ciriminna

Capitolo 1

VERSO LA RIVOLUZIONE DELL'ENERGIA SOLARE

1.1. CELLE SOLARI FLESSIBILI



Figura 1.1
I display elettronici flessibili basati su tecnologia OLED che stanno per arrivare sul mercato permettono di leggere con comfort ovunque (foto riprodotta da Plastic Logic)

I dispositivi elettronici flessibili invaderanno il mercato globale in tempi molto brevi, ad iniziare dai display flessibili basati sulla tecnologia degli OLEDs (*organic light-emitting diods*), che dalla fine del 2008 verranno prodotti in Germania con una capacità iniziale di più di un milione di moduli all'anno. Applicati sotto forma di strati sottili depositati su plastica flessibile, lo spessore limitatissimo, il peso ridotto e la resistenza garantiti dalla marcata flessibilità degli schermi rendono la lettura sullo schermo comoda e versa-

tile quanto può esserla quella di un giornale¹. Mentre la connettività *wireless* consentirà agli utenti di comprare e scaricare un libro o ancora avere l'ultima edizione di un quotidiano quando e dove desiderano.

A loro volta, dapprima una batteria e successivamente un modulo solare polimerico (figura 1.2) alimenteranno il dispositivo in questione, rendendo possibile l'accesso a grandi quantità di informazione senza dover essere connessi con cavi e prese alla rete elettrica.



Figura 1.2
I moduli solari in *Power Plastic* (sinistra, foto di Konarka) o quelli in Si amorfo (destra, foto di Flexcell) sono leggeri (25-50 g/m²), costano da tre a cinque volte meno dei pannelli convenzionali e sono adatti a soluzioni personalizzate di ogni tipo

La visione è quella della cosiddetta *plastic electronics*, ovvero stampare circuiti e funzionalità elettroniche su substrati flessibili a temperatura ambiente (modeste quantità di energia) e con processi di stampa *roll-to-roll* (ad altissima produttività) eguali a quelli impiegati per la stampa dei giornali. Tali dispositivi fotovoltaici (FV, da ora in poi) offrono quindi una fonte energetica alternativa a basso costo, leggera, silenziosa e pulita per applicazioni in interno e in esterno, con i vantaggi evidenti descritti di seguito².

Altamente flessibile

La flessibilità consente l'integrazione con elementi di varia forma e il design di prodotti innovativi.

Personalizzabile

Il processo di manifattura *roll-to-roll* consente la produzione personalizzata di moduli FV di varia larghezza e lunghezza, rendendo la tecnologia adatta a soluzioni di integrazione personalizzate.

¹ Fino ad oggi, la gente si è mostrata restia a leggere su computer portatili o sui palmari a causa della scomodità. Il primo display flessibile ad alta leggibilità è in corso di produzione massiva nell'impianto di Dresda della Plastic Logic: www.plasticlogic.com.

² Adattato da Flexcell: www.flexcell.ch.

Sottile e leggero

La leggerezza del foglio solare FV lo rende adatto a tutte le applicazioni in cui il peso è importante. La natura ultrasottile del foglio FV a sua volta consente l'integrazione con i materiali più svariati.

Infrangibile

Diversamente dai moduli in silicio cristallino, che utilizzano tutti substrati in vetro fragili e ampi, i moduli FV flessibili usano polimeri flessibili e sottili resistenti, durevoli e sicuri da manipolare.

Ecologico

I moduli FV flessibili sono ecologici perché l'elettricità prodotta deriva dall'impiego di materiali economici e riciclabili. Il *payback* energetico è da 3 a 5 volte più veloce dei prodotti basati sulle tecnologie FV convenzionali.

Il materiale fotovoltaico viene quindi stampato su un rullo di plastica conduttrice o di alluminio sottile applicando l'attuale tecnologia estremamente veloce della stampa dei quotidiani (figura 1.3). La tecnica di stampa consente di massimizzare lo sfruttamento dei materiali fotoattivi. Pertanto, questa tecnica semplice e ad alta resa che non necessita di atmosfere particolari ma ha luogo in aria, rende superflui trattamenti costosi come le deposizioni sotto vuoto, largamente usati in ambito industriale per realizzare celle solari a film sottile.

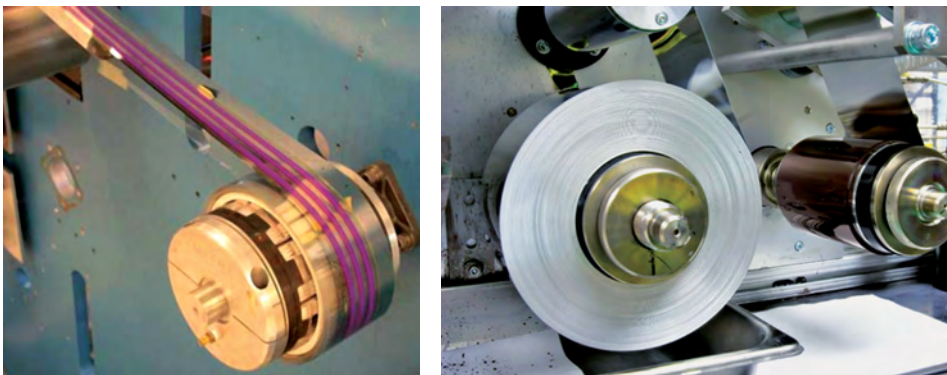


Figura 1.3 - La produzione di moduli fotovoltaici *Plastic Power* tramite la tecnica *roll-to-roll* (a sinistra, foto riprodotta da Konarka) è analoga alla deposizione del semiconduttore CIGS, sotto forma di inchiostro, su fogli di alluminio (a destra, foto riprodotta da Nanosolar)

Le celle solari in figura 1.3 (organiche le prime, inorganiche le seconde) sono leggere, flessibili e pertanto molto più versatili delle celle in silicio cristal-

lino; rappresentano una nuova categoria di prodotti facilmente ricopribili, che possono essere utilizzati in tantissime applicazioni dove non è possibile adattare il fotovoltaico tradizionale.

La funzionalità fotovoltaica viene quindi integrata a basso costo in strutture preesistenti, con la possibilità di stampare strati di materiale attivo praticamente ovunque, dalle finestre ai tetti, su pareti esterne ed interne, e così via. Le celle solari flessibili, infatti, sostituiscono l'approccio tradizionale dell'installazione con una strategia di integrazione (figura 1.4).

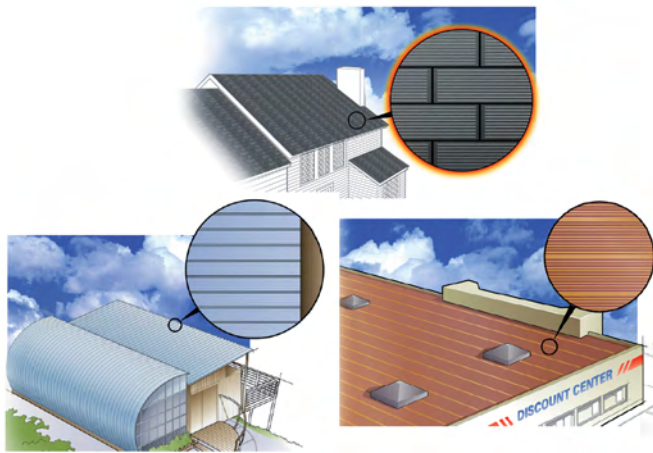


Figura 1.4
I nuovi moduli solari flessibili sono integrati, piuttosto che installati, in strutture preesistenti o nuove (adattata da Konarka)

Più in generale, l'uomo sta finalmente imparando come sfruttare efficientemente l'immensa quantità di energia solare che raggiunge la Terra in ogni secondo, operando su scala nanometrica. In altre parole, sta imparando come ottenere elettricità solare a basso costo.

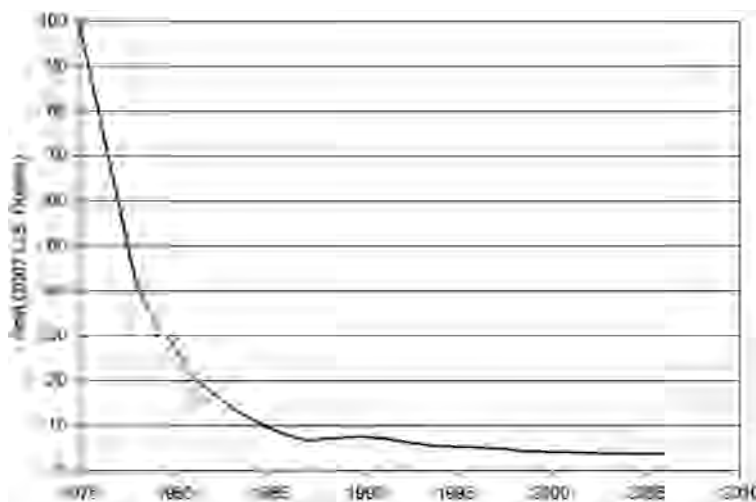
Il prezzo medio per un modulo fotovoltaico, esclusa installazione e altri costi di impianto, è diminuito dai quasi 100 dollari (\$) per watt nel 1975 ai circa 4\$ per watt alla fine del 2006 (figura 1.5).

Nel 2004, l'Associazione dei produttori di fotovoltaico europei avanzava la previsione di un costo di produzione dei moduli fotovoltaici a film sottile che avrebbe raggiunto 1\$ per watt nel 2010³, un costo che renderebbe il fotovoltaico competitivo con quello dell'elettricità prodotta bruciando carbone.

Ma la previsione si è rivelata pessimistica perché alla fine del 2007 l'azienda americana Nanosolar ha iniziato la commercializzazione dei primi moduli

³ Hoffmann W.: *A Vision for PV Technology up to 2030 and beyond - An industry view*, European Photovoltaic Industry Association, Brussels, September 28th, 2004.

Figura 1.5
Costo medio
in dollari per watt
dei moduli fotovoltaici
nel periodo 1975-2006
(Fonte: Earth Policy
Institute, 2007)



fotovoltaici di nuova generazione che generano elettricità per un costo di soli 0,99\$ a watt, fornendo a un produttore di energia di quel Paese una quantità di pannelli (chiamati *utility panel*, figura 1.6) sufficiente a costruire una centrale fotovoltaica da 1 MW.

Si tratta di celle solari a film sottile, prodotte stampando su un foglio di alluminio un inchiostro costituito dal semiconduttore inorganico CIGS (capi-

Figura 1.6
Gli *utility panel*
(qui sono mostrati
quelli forniti a Beck
in Germania
nel dicembre 2007),
progettati
da Nanosolar
per la costruzione
di centrali FV
in campo aperto,
forniscono energia
al costo più basso
mai riportato
in fotovoltaica
e possono essere
prodotti e installati
in tempi record



tolo 3), che mostrano elevatissime performance che le rendono ideali, ad esempio, per la costruzione di centrali FV in campo aperto alla periferia di città e centri abitati.

1.2. L'ARRIVO DELL'ERA SOLARE

L'aumento senza precedenti storici del prezzo del petrolio e i cambiamenti climatici hanno recentemente riacceso l'interesse della politica internazionale per le fonti energetiche rinnovabili (RES). Nello scenario⁴ (credibile) sviluppato dallo *European renewable energy council* (EREC) che rappresenta una previsione riguardante la distribuzione della produzione energetica mondiale nell'anno 2040, dei 36mila TWh (più che raddoppiati rispetto ai 15mila TWh del 2001), le fonti energetiche rinnovabili forniranno oltre l'80% del fabbisogno totale di elettricità (30mila TWh), con l'energia solare fotovoltaica che predominerà su tutte le altre (tabella 1.1).

Tabella 1.1.

Distribuzione della produzione elettrica mondiale nell'anno 2040: le fonti energetiche rinnovabili forniranno 29,81 TWh dei 36,346 TWh richiesti (più che raddoppiati rispetto ai 15,578 del 2001) (Fonte: EREC)

	2001	2010	2020	2030	2040
Consumo totale in TWh	15578	19973	25818	30855	36346
Biomasse	110	220	570	1230	2200
Grande Idro	180	390	1010	2180	4290
Piccolo Idro	2590	3095	3590	3965	4165
Eolico	54,5	512	3093	6307	8000
PV	2,2	20	276	2570	9113
Solare termico	1	5	40	195	790
Geotermico	50	134	318	625	1020
Marino	0,5	1	4	37	230
Totale RES	2988,2	4377	8901	17109	29808
Contributo RES	19,2%	21,9%	34,5%	55,4%	82%

Sostenere tuttavia che si sta entrando nell'era solare, quando il consumo mondiale di petrolio è fortemente in rialzo, può suonare come una falsa profezia di tipo ambientalista. Tutte le previsioni che davano un picco del petrolio fatte nel 1968 si sono rivelate errate⁵. Non si è mai avuta carenza di petro-

⁴ Renewable energy scenario to 2040, Erec, Bruxelles, 2007. http://www.ren21.net/pdf/erec_scenario%202040.pdf.

⁵ Maugeri L.: *The Age of Oil - The Mythology, History, and Future of the World's Most Controversial Resource*, New York, Praeger Publishers, 2006.

lio e l'esaurimento delle riserve di petrolio mondiali è un tema vivamente dibattuto⁶.

D'altra parte, la domanda di petrolio è esplosa in concomitanza alla globalizzazione e alla crescente richiesta da parte di Cina e India, dove i governi stanno gestendo l'ingresso nel mondo dell'industria di circa 700 milioni di coltivatori, cioè più o meno il doppio dei lavoratori che conta complessivamente l'Unione Europea. Allo stesso tempo 1,64 miliardi di persone, principalmente nei paesi in via di sviluppo, non sono ancora connessi a una rete elettrica; a ciò si deve aggiungere che la richiesta di energia mondiale sarà più che raddoppiata entro il 2050 e triplicata prima della fine del secolo.

Tutto questo ha fatto sì che il prezzo del petrolio sia aumentato di un fattore 5 negli ultimi dieci anni (da 20 a oltre 100 \$/barile), il che è dovuto anche alle difficoltà e al relativo aumento dei costi dell'estrazione, come è avvenuto negli Stati Uniti dove oggi la rendita è di soli 15 Joule di energia per ogni Joule investito (mentre negli anni Trenta l'EROI – *Energy return on energy invested* – era di circa 100)⁷.

Infine, la popolazione mondiale sta prendendo rapidamente coscienza del fatto che il cambiamento climatico dovuto alle attività antropiche è una triste realtà che in America, ad esempio, ha già colpito intere città (come New Orleans, 2005) e nel sud d'Europa ha messo in ginocchio milioni di persone, e più in generale l'intero ecosistema, con temperature vicine a 50°C a metà giugno 2007.

Complessivamente, questi fattori critici ambientali, economici e sociali richiedono di diminuire drasticamente le emissioni di CO₂, e passare quindi rapidamente all'uso di materiali ed energie rinnovabili su grande scala. L'energia elettrica di origine solare è in assoluto la fonte rinnovabile più pulita e desiderabile, ma il suo costo elevato ha fatto sì che oggi essa copra solo lo 0,1% della produzione energetica globale (15 terawatt, che ogni 10 anni aumentano dell'attuale consumo medio annuale degli USA).

I bassi prezzi del petrolio negli anni Novanta (da \$10 a \$20 per barile) hanno fatto da freno per un decennio allo sviluppo del settore fotovoltaico, ma lo scenario è completamente cambiato con il boom dei prezzi, e da quasi dieci anni, ormai, la generazione di elettricità con la radiazione solare è la fonte rin-

⁶ Per esempio, un geologo di un'industria di petrolifera suggerisce che il petrolio abbia piccato alla fine del 2005: Deffeyes K.S.: *Beyond Oil: The View from Hubbert's Peak*, Hill and Wang, New York, 2005.

⁷ Cleveland C.J., Hall C.A.S., Herendeen R.: *Energy returns on ethanol production*, Science 2006, 312, 1746.

novabile che cresce più rapidamente di ogni altra, raddoppiando il suo valore ogni due anni (figura 1.7)⁸.

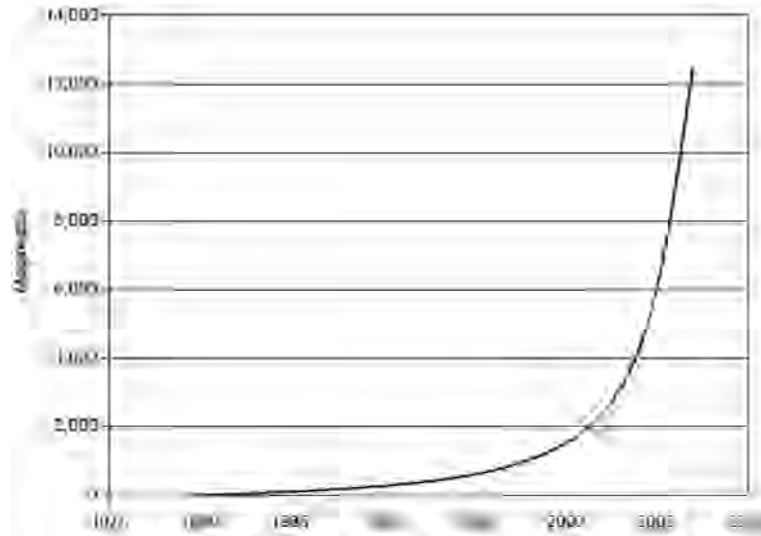


Figura 1.7
Produzione
fotovoltaica annuale,
anni 1975-2007: 3,8
GW alla fine del 2007
(Fonte: *Earth Policy
Institute*, 2007)

Ad esempio, la produzione è passata dai 2521 MW del 2006 ai 3800 MW del 2007. E ovviamente, al crescere del prezzo dell'energia di origine fossile, la competitività dell'energia fotovoltaica – già riconosciuta per la fornitura di energia elettrica in ambienti rurali o a sistemi non connessi alla rete elettrica – cresce mese dopo mese.

Ad esempio, utilizzare l'energia prodotta dal proprio impianto FV durante le ore di picco (mezzogiorno), quando cioè il costo del kWh è massimo rispetto alle restanti ore della giornata, significa diminuire drasticamente i guadagni delle società di generazione elettrica tradizionali proprio perché un impianto FV raggiunge la sua massima produttività nelle ore in cui le tariffe del kWh sono le più alte (figura 1.8)⁹.

Questo spiega il motivo per cui il settore attualmente attragga investimenti a un tasso di crescita senza precedenti (circa 71 miliardi di dollari di nuovi investimenti nel 2006, corrispondenti al 43% di aumento sull'anno precedente), con un fatturato globale stimato di 11 miliardi di dollari per l'industria fotovoltaica nel corso del 2009.

⁸ Dorn J.G.: *Solar Cell Production Jumps 50 Percent in 2007*, Earth Policy Institute, Washington, 27 dicembre 2007. www.earth-policy.org/indicators/solar/2007.htm.

⁹ Il report dell'Associazione industriale europea del fotovoltaico, EPIA roadmap, giugno 2004. Disponibile all'URL http://www.epia.org/fileadmin/epia_docs/publications/epia/epiaroadmap.PDF.

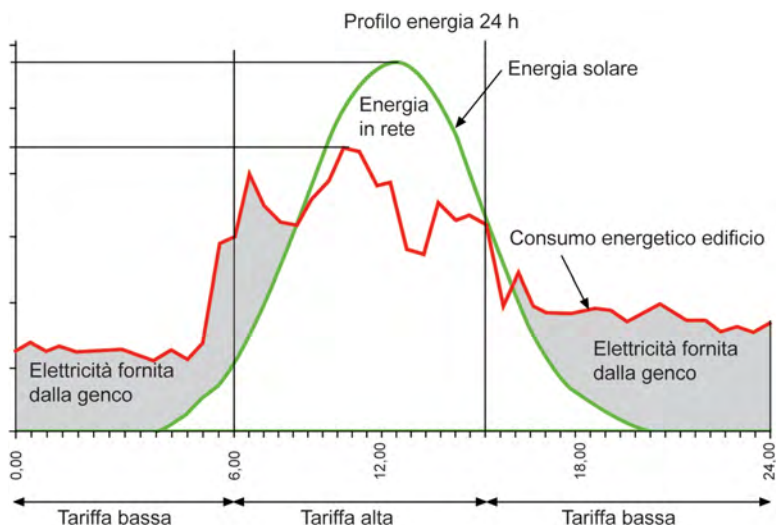


Figura 1.8
Correlazione
tra la produzione
di potenza
fotovoltaica
giornaliera
e il consumo
di energia
di un edificio
di uffici in Spagna
(Fonte: EPIA, 2004)

Per rendere l'energia solare la fonte primaria della produzione mondiale di energia, sono necessarie innovazioni radicali, basate su nuove tecnologie molto più efficienti ed economiche di quelle fondate sul silicio. E anche se è ancora oggetto di studio il tipo di materiale di cui farà uso, questa evoluzione tecnologica (figura 1.9) vedrà prima l'adozione su vasta scala di tecnologie a film sottile e poi quella di nuove tecnologie basate su effetti quantistici come quelli sfruttati da celle multiple a base di materiali come il GaAs o il grafene.

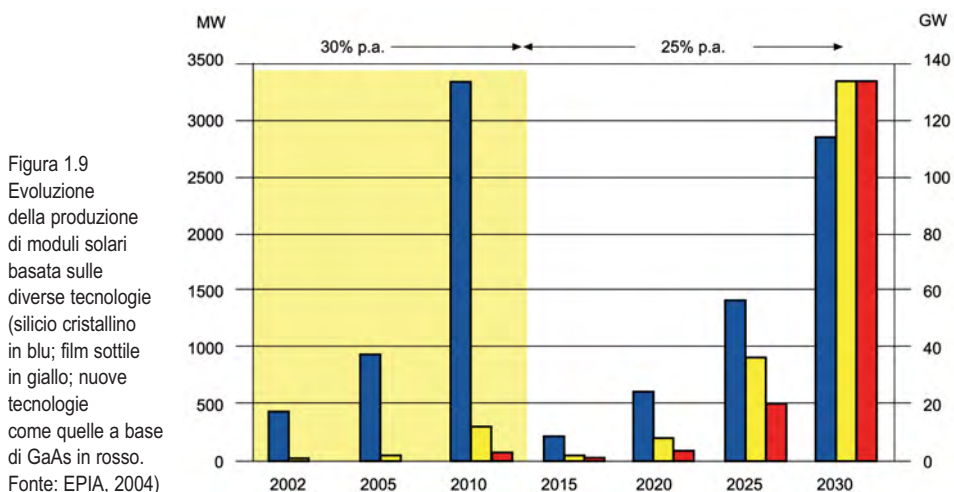


Figura 1.9
Evoluzione
della produzione
di moduli solari
basata sulle
diverse tecnologie
(silicio cristallino
in blu; film sottile
in giallo; nuove
tecnologie
come quelle a base
di GaAs in rosso.
Fonte: EPIA, 2004)