

SVILUPPO SOSTENIBILE ED ENERGIA DAL SOLE

POTENZIALITÀ E LIMITI DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA

di Sergio Pizzini*

Un tema attuale di cui spesso i mass media offrono occasioni di dibattito. Non sempre però fornendo quelle conoscenze, anche quantitative, necessarie per una riflessione critica e una acquisizione consapevole di tutti i fattori in gioco. L'autore offre una sintesi ragionata dello status questionis, utile all'insegnante per un aggiornamento serio e allo studente degli ultimi anni di liceo per approfondire una problematica oggi sicuramente coinvolgente. Con una non trascurabile valenza di orientamento per la scelta degli studi universitari, in relazione ai possibili sviluppi della ricerca scientifica e tecnologica.

* Ordinario di Chimica
Fisica presso l'Università
degli Studi di Milano-
Bicocca

Anche se da tempo la possibilità di ottenere energia elettrica illuminando un semiconduttore, inserito in un opportuno circuito elettrico, era nota e l'uso di dispositivi fotovoltaici era divenuto di impiego corrente per applicazioni civili in sistemi di controllo automatico, solo in conseguenza della prima crisi energetica nel 1973 la conversione fotovoltaica ha iniziato a riscuotere consenso e interesse come fonte potenziale di approvvigionamento energetico. In quegli anni si cominciò a riflettere sulle dimensioni certamente finite delle riserve di combustibili fossili e sui rischi, per il mondo occidentale, di dipendere in maniera quasi esclusiva da forniture di greggio da parte dei paesi del medio oriente, soggetti a ogni sorta di instabilità politica e socio-economica.

Fra le soluzioni proposte in quegli anni, alcune, come la riduzione dei consumi per la motorizzazione, si sono dimostrate di breve periodo, altre, come il risparmio energetico con migliori tecniche di coibentazione degli edifici e l'uso del vento e del Sole come sorgenti alternative di energia, sono ormai entrate, a livelli diversi, nella nostra vita quotidiana, senza tuttavia competere con il petrolio e con il nucleare come sorgenti energetiche principali.

È noto, d'altra parte, che l'uso dell'energia nucleare, il cui sviluppo in campo civile sembrava ormai inarrestabile, ha subito un arresto a seguito dei due gravissimi incidenti di Three Miles Island nel 1979 e di Chernobil nel marzo del 1986. Il ventennio successivo, fino alla fine degli anni Novanta, ha visto, contemporaneamente al forte sviluppo in Europa, in Giappone e negli USA di attività di ricerca e sviluppo nel settore delle energie alternative (eolico, fotovoltaico, maree, eccetera), l'ingresso nel

mercato dell'impiantistica eolica e fotovoltaica, sostenuta da misure di protezione e di assistenza finanziaria da parte di agenzie governative e una graduale, forte ripresa del consumo di idrocarburi, in particolare del metano, sostenuto da un'economia mondiale in forte espansione.

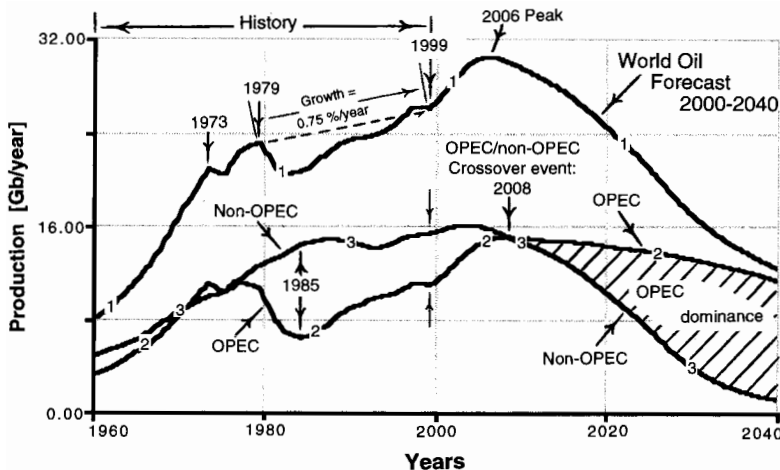
Gli avvenimenti più recenti, caratterizzati da forme di dematerializzazione dell'economia nei paesi avanzati, dall'ingresso della Cina nel mercato globale, dalle guerre in medio-oriente e dalla crisi del mercato degli idrocarburi, il cui costo sembra destinato ormai a salire sistematicamente, portano alla percezione che vincoli sempre più forti, direttamente legati al costo del lavoro e all'approvvigionamento di energia, condizionano l'espansione dell'economia mondiale.

Al di là di considerazioni relative al costo del lavoro nei paesi dell'occidente, e ai conseguenti trasferimenti della produzione, che esulano dal tema di questa rassegna, quale potrebbe essere il ruolo delle energie alternative per il futuro del pianeta?

È questo il tema che intendo sviluppare nelle pagine successive.

Produzione e consumi di energia: considerazioni macroeconomiche

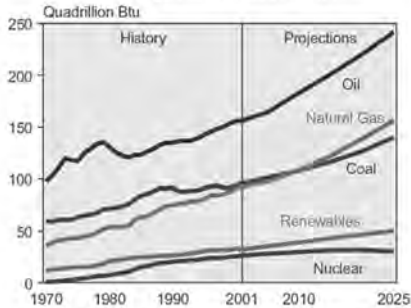
La figura riporta l'andamento della produzione di idrocarburi dal 1960 in avanti e le previsioni per i prossimi quarant'anni. Si vede chiaramente come sia previsto un picco della produzione per l'anno 2006, seguito da una sua forte diminuzione, che arriverà al 50% della produzione attuale nel 2040, con un predominio di fonti OPEC.



Andamento della produzione di petrolio: storia recente e previsioni fino al 2040 (1 barile = 158.9 litri = 6.148 GJoule; 1 Gbarile = $6.1 \cdot 10^{18}$ Joule); la media annuale OPEC 2005 è di 11 600 Gbarile (fonti Opec luglio 2005)

A fronte di questa diminuzione nella disponibilità, fonti della *Energy Information Administration*, mostrano che si sta assistendo a una tendenza sistematica all'aumento dei consumi di idrocarburi e carbone, associata a un moderato apporto delle energie rinnovabili e del nucleare,

World Primary Energy Consumption by Energy Source, 1970-2025



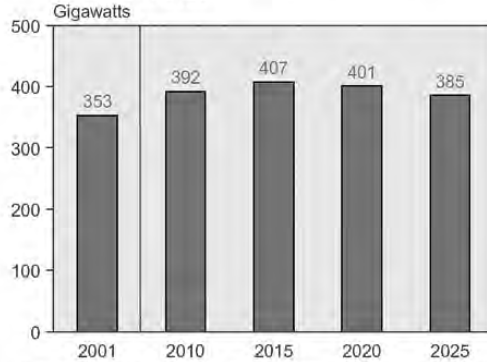
Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2001*, DOE/EIA-0219(2001) (Washington, DC, February 2003), web site www.eia.doe.gov/ieal/. **Projections:** EIA, *System for the Analysis of Global Energy Markets* (2004).

Consumo di energie primarie
in una scala di 10^{15} BTU =
 $1.06 \cdot 10^9$ GJ

Evoluzione della capacità di produzione di energia elettrica per via nucleare

come si può vedere nella figura a lato e, in dettaglio, anche nella figura sottostante, che mostra la prevista crescita di produzione di energia da fonti nucleari.

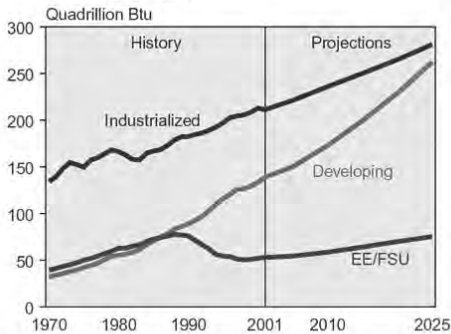
World Installed Nuclear Capacity, 2001-2025



Sources: **2001:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2001*, DOE/EIA-0219(2001) (Washington, DC, February 2003), web site www.eia.doe.gov/ieal/. **Projections:** EIA, *System for the Analysis of Global Energy Markets* (2004).

È di particolare interesse, infine, che le previsioni relative alle diverse aree geografiche del pianeta mostrano che l'aumento maggiore nella crescita dei consumi è relativo ai paesi emergenti ed è probabilmente sottostimato per quanto si riferisce alla Cina (si veda la figura a lato).

World Energy Consumption by Region, 1970-2025



Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2001*, DOE/EIA-0219(2001) (Washington, DC, February 2003), web site www.eia.doe.gov/ieal/. **Projections:** EIA, *System for the Analysis of Global Energy Markets* (2004).

Previsioni relative al consumo di energia in varie aree geografiche del pianeta

Questi dati macroeconomici possono essere completati, osservando in primo luogo che il consumo stimato annuale nel 2001 corrisponde a circa 150 GJ e si può prevedere quasi un raddoppio del consumo di energia da fonti primarie nel 2040; inoltre il petrolio, il gas naturale e il carbone contribuiscono per l'89.8% all'*input* di energie primarie, il nucleare e l'idroelettricità per il 10.2% con la seguente ripartizione: petrolio 40.6%, gas naturale 24.2%, carbone 25.0%, nucleare 7.6% (USA 20%) e idroelettrico 2.7%; si stima poi che il 42% delle energie primarie venga usato per produrre elettricità (l'equivalente di 3 600 centrali di potenza da 1 GW ciascuna), che il petrolio contribuisca per il 39% agli usi non elettrici, cui contribuisce anche il metano per il 18% e il carbone per non più dell'1%; e infine la potenza necessaria per soddisfare i consumi energetici di tutto il mondo, oggi, è di circa $8 \text{ TW} = 8 \cdot 10^{12} \text{ W}$, corrispondenti a un consumo annuale di energia di circa $150 \cdot 10^9 \text{ GJ}$.

Si può pertanto osservare che a fronte di una previsione di un massimo nella produzione di greggio, e quindi delle energie primarie disponibili

intorno al 2006, e di un calo della produzione fino a raggiungere il 50% dell'attuale nel 2040, i consumi aumenteranno con una progressione superlineare (almeno l'8-15% per anno). Poiché la disponibilità globale di energie primarie sarà da ridistribuire tenuto conto della crescita dell'economia nell'Estremo Oriente, possiamo prevedere che nel 2040 il mondo occidentale potrà contare su non più di circa il 25% dell'attuale disponibilità di energie primarie, se la distribuzione dei consumi e delle fonti di energia dovesse rimanere la stessa dell'attuale. Sappiamo dai *media* che le grandi *corporation* dell'energia stanno prevedendo come rimedi alla prossima crisi energetica un maggiore uso del gas naturale, del carbone e del nucleare di terza generazione, indipendentemente dal fatto che l'aumento dell'uso dei combustibili fossili provochi un aumento nella produzione dei gas serra.

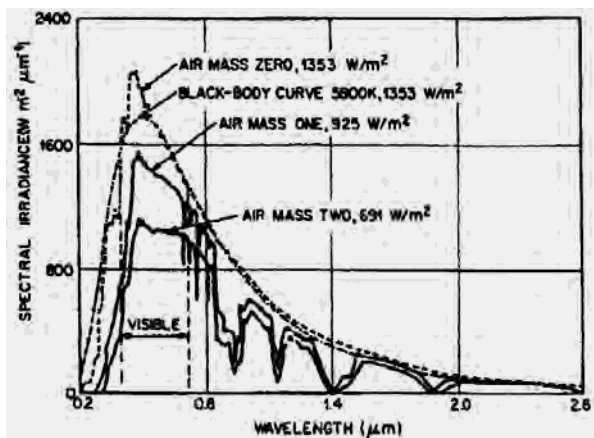
Possiamo anche prevedere, considerando che le conoscenze e le tecnologie di base per la produzione di idrocarburi a partire dal carbone sono disponibili, anche se necessitano di radicali miglioramenti, che l'autotrazione non subirà gravi scosse per effetto della penuria di idrocarburi fossili. È pertanto probabile che la crisi energetica sarà provocata non tanto dalla scarsità di risorse primarie quanto dalla concomitanza di problemi associati al controllo dell'accesso alle fonti e a quelli relativi al riscaldamento globale, rendendo inevitabile il ricorso alle energie rinnovabili e al nucleare.

Ma sono le energie alternative una realistica possibilità per uscire dall'«imbuto», in concorrenza diretta con il nucleare?

Discuteremo ora le potenzialità della conversione fotovoltaica per ottenere direttamente energia elettrica dalla radiazione solare, anche se vedremo che il riscaldamento di un fluido ad alta temperatura mediante la radiazione solare potrebbe consentire efficienze di conversione interessanti utilizzando un convenzionale ciclo termodinamico, come proposto recentemente dal premio Nobel Carlo Rubbia e in fase di sperimentazione presso l'ENEA.

Il Sole come risorsa energetica da sfruttare: *sun harvesting*

Il Sole è un motore termonucleare che sviluppa una potenza straordinaria, se confrontata con il livello di economia energetica terrestre. Qualche dato relativo all'energia disponibile. Alla superficie del Sole, con una temperatura di circa 5 800 K, la radiazione emessa ammonta a 64 MW/m²; la radiazione che arriva alla Terra, fuori dell'atmosfera, è di 1.36 KW/m². La superficie della terra illuminata dal Sole ammonta a 1.28•10⁸ km²; la potenza totale corrisponde pertanto a 1.75•10⁵ TW ed è quindi 1.75•10⁴ volte superiore a quella necessaria per rispondere alle necessità energetiche attuali di tutta la Terra, che come abbiamo visto più sopra, è di circa 10 TW (nel 2005).



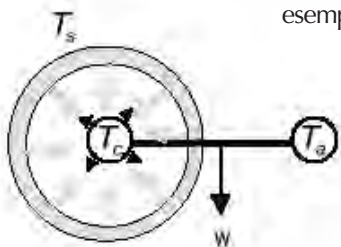
La quantità di superficie necessaria per convertire in elettricità, con una efficienza del 10% tutta l'energia solare necessaria per la Terra, ammonta a circa $7 \cdot 10^5 \text{ km}^2$ e quindi a un quadrato di 800 km di lato, trascurando l'effetto dell'atmosfera, che assorbe selettivamente una frazione non trascurabile dell'energia disponibile, come si può vedere nella figura a lato, che riporta lo spettro solare fuori dell'atmosfera (convenzionalmente definito ad *Air Mass 0*) e alla superficie della Terra, convenzionalmente riportato in termini di *Air Mass 1* e 2.

Spettro di emissione del Sole fuori dell'atmosfera (*Air Mass 0*), confrontato con la emissione di un corpo nero a 5 800 K e con lo spettro solare modificato per effetto dell'atmosfera terrestre (il numero associato ad *Air Mass* è definito come $1/\cos\varphi$, dove φ è l'angolo compreso fra la direzione del Sole e la verticale sull'oggetto illuminato)

Conversione dell'energia solare in energia elettrica

Possiamo ora chiedere con quale efficienza sia possibile convertire in lavoro l'energia solare prendendo inizialmente in considerazione la macchina termica schematizzata nella figura sottostante che permette di valutare il limite termodinamico, utilizzando un opportuno fluido riscaldato a 2 470 K e uno scambiatore di calore a temperatura $T = 273 \text{ K}$.

In queste condizioni l'efficienza di Carnot è prossima al 90%, ma il raggiungimento pratico di questa efficienza con una macchina termica (per esempio una turbina a gas, usando l'elio come fluido di raffreddamento grazie e alle sue buone proprietà termiche e di inerzia chimica) presenta problemi quasi insuperabili dal punto di vista dei materiali di costruzione. Infatti solo alcuni (pochi) materiali metallici (Ta, W, Os, C) hanno temperature di fusione sufficientemente alte da poter operare a questa temperatura, senza per altro garantire le necessarie qualità meccaniche. Le applicazioni attuali prevedono infatti temperature dei fluidi intorno a 700-1 000 K che consentirebbero tuttavia efficienze interessanti intorno al 70%.



Schema di un motore termico costituito da un concentratore solare e da uno scambiatore di calore raffreddato da un fluido operante fra le temperature 2 470 K e 300 K

In questo caso il processo di produzione di energia elettrica da energia solare prevede la captazione dell'energia solare mediante concentratori, la produzione di vapore ad alta temperatura e il suo uso per alimentare una turbina collegata a un alternatore. Il rendimento complessivo dipenderà pertanto dall'efficienza dei due cicli combinati e da quella del processo di captazione dell'energia solare mediante concentratori a inseguimento. Considerando che la collocazione ideale di impianti di questo tipo dovrebbe essere in zone desertiche ad alta insolazione, limite essenziale di questo tipo di utilizzo è la gestione del processo di scambio termico a bassa temperatura.

Poiché un sistema fotovoltaico permette invece la conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica, la conversione fotovoltaica presenta vantaggi impiantistici evidenti. Sia nel caso fotovoltaico che solare termi-

co, la superficie di captazione della radiazione solare dipende comunque dall'efficienza finale del processo mentre l'economia del processo dipende dai materiali e processi utilizzati per la captazione e la trasformazione.

La conversione fotovoltaica nell'era del silicio

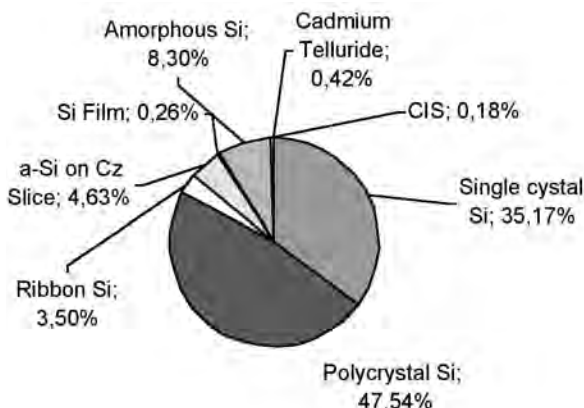
Una previsione attendibile della produzione totale annuale di celle fotovoltaiche nel 2005 è dell'ordine di 1 GW, mentre la capacità produttiva è probabilmente intorno ai 3 - 5 GW, per un valore di circa 3 000 Me e con un tasso di crescita nell'ultima decade compreso fra il 15 e il 30% annuo. Questo alto tasso di crescita è sostenuto in gran parte da programmi governativi di supporto, e in particolare da quelli in Germania e in Giappone relativi all'utilizzo del fotovoltaico per edilizia abitativa e per la ricopertura dei tetti. La potenza installata rappresenta tuttavia meno dello 0.05% della potenza disponibile da centrali convenzionali (termiche, idroelettriche e nucleari) e rappresenta meno dello 0.05% in termini di energia prodotta. Questa produzione è quindi ancora lontana da costituire un contributo apprezzabile al consumo energetico mondiale.

Se il tasso di crescita permarrà a questi livelli per i prossimi vent'anni, intorno al 2025 dovrebbe essere disponibile una capacità produttiva intorno ai 100 GW, una frazione intorno a meno del 5% della potenza che dovrebbe essere disponibile per quegli anni.

Per quanto si riferisce invece ai costi, un'analisi della Commissione Europea (si veda la tabella 1) suggerisce che a fronte di un costo dell'energia elettrica alla centrale di 4 ¢cent/kWh (tra 7 e 10 ¢cent/kWh dopo l'eliminazione di gas serra) e al consumatore di 10 ¢cent/kWh (tra 13 e 16 ¢cent/kWh dopo l'eliminazione di gas serra), il costo attuale dell'energia elettrica da fotovoltaico è superiore di almeno un fattore 5 a quello termico, mentre diventerebbe competitivo nel lungo termine, grazie alla riduzione dei costi di produzione. Diventa pertanto necessario esaminare con attenzione i fattori che possono determinare l'evoluzione dei costi di produzione, dopo aver analizzato la ripartizione del mercato fotovoltaico in termini di materiali utilizzati per la costruzione di celle solari. La disponibilità, il costo e la compatibilità ambientale di questi ultimi condiziona infatti sia le potenzialità di sviluppo che i costi di produzione.

Sviluppo del mercato dell'energia da sorgenti rinnovabili

	Current share (rate of annual increase)	Current cost of electricity ¢cent	Target long term electricity cost ¢cent
PV	0.15% (30%)	25 - 50	6 - 10 (3 - 5)
Wind	1.5% (40%)	4 - 9	3 - 5
Biomass	na	4 - 8	3 - 5
Geothermal hot dry rock	na	12	4
Solar Thermal	na	12	4



Ripartizione del mercato delle celle solari terrestri in funzione del materiale di base (silicio cristallino, silicio policristallino, silicio amorfo (a-Si), silicio in nastro (ribbon), tellururo di cadmio e seleniuro di rame e indio (CIS))

Si vede nella figura a lato che il mercato delle celle solari per applicazioni terrestri è attualmente dominato dalle celle solari al silicio ed è altamente probabile che il silicio manterrà anche in futuro questo primato, dovuto in larga misura, almeno fino a oggi, alla sua disponibilità in quantità e qualità compatibili con la richiesta. Per quanto si riferisce invece all'alimentazione di satelliti e stazioni spaziali, dove il costo non ha un ruolo predominante, ma è invece essenziale l'efficienza, la durata e la resistenza ai danni di irraggiamento, l'uso di celle a base di arseniuro di gallio (GaAs) è la tecnologia primaria.

Il silicio, d'altra parte, è il semiconduttore di elezione per l'industria microelettronica, e pertanto associa il requisito di un'eccezionale conoscenza accumulata relativa alle sue proprietà elettroniche di base e ai processi tecnologici a esso connessi, a una praticamente illimitata disponibilità di risorse di materie prime e all'assenza di nocività ambientale. Esso può essere impiegato in diverse forme strutturali (monocristallino, multicristallino, amorfo) e anche sotto forma di film sottile, presenta elevate mobilità e buone lunghezze di diffusione dei portatori fotogenerati, del tutto compatibili con elevate efficienze di conversione.

Le attuali applicazioni del fotovoltaico comprendono il suo sistematico utilizzo in sistemi fissi di segnalazione (boe, pannelli autostradali, eccetera); l'alimentazione di ripetitori di reti in microonde in località isolate, di sistemi di comunicazione nei rifugi alpini o in abitazioni rurali non connesse alla rete; l'inserimento di sistemi fotovoltaici come elementi strutturali in architettura; l'inserimento di pannelli fotovoltaico sui tetti di abitazioni private o edifici industriali e pubblici in Germania e Giappone; qualche impianto di potenza in Europa, Giappone e Stati Uniti. Dobbiamo tuttavia osservare che non esiste ancora un vero mercato del fotovoltaico; la molla allo sviluppo è infatti il supporto di commesse governative per le applicazioni energetiche mentre la sua applicazione in mercati di nicchia non presenta, per i produttori di celle e pannelli, garanzia di economie di produzione e di profitto.

I principali ostacoli alla sua diffusione sono di natura tecnica, economica e politica. Infatti il rendimento di una cella di silicio standard ($\eta = 10 - 16\%$) è inferiore a quello delle celle di laboratorio per effetto di deviazioni dall'idealità del diodo e a causa della ricombinazione dei portatori fotogenerati nel volume del semiconduttore e di perdita di fotoni «utili» (riflessione alla superficie, mancato assorbimento). Il rendimento delle celle al silicio amorfo è stazionario intorno all'8 - 10% e non è prevedibile un suo aumento per questioni associate alle proprietà chimico-fisiche del materiale, che orientano il suo futuro ad applicazioni di nicchia o all'elettronica di consumo.

I costi eccessivi del materiale e la sua ridotta disponibilità sono eccessivi. Le caratteristiche dei substrati, generalmente fette di silicio di dimensioni massime 15 x 15 cm, non consentono una produzione di celle in continuo. Non esiste ancora una sensibilità sufficiente ai problemi dell'ambiente e a quelli relativi alla reale finitezza delle risorse di combustibili fossili, tale da indurre provvedimenti di reale impatto nei confronti dello sviluppo di tecnologie di produzione dell'energia rispettose dell'ambiente.

Considerando che il trasferimento dell'energia prodotta in impianti di potenza avviene già ora utilizzando la rete di distribuzione, l'uso diffuso del fotovoltaico implicherebbe comunque una gestione accurata della rete associata a una ottimizzazione dei consumi, in contemporaneità con iniziative di risparmio, come quelle che in prospettiva potrebbero essere realizzate con lo sviluppo di lampade per illuminazione a basso consumo, quali quelle basate sui nitruri semiconduttori.

Il futuro del fotovoltaico dipende quindi da una molteplicità di fattori, solo parte dei quali dipendenti direttamente dallo stato attuale della tecnologia, che è estremamente promettente.

Un fattore molto critico è il costo (che incide per circa il 30% sui costi della cella) e la disponibilità del silicio, tenuto conto che per altri materiali di potenziale interesse (tellururo di cadmio, seleniuro di rame e indio) la ridotta disponibilità e non compatibilità ambientale gioca un ruolo maggiore.

Per raggiungere il 10% del totale dell'energia elettrica necessaria a livello planetario (a consumi costanti 2001 \approx 0.4 TW) si dovrebbero infatti installare circa 800 GW, considerando una media di 12 ore di produzione al giorno. Usando celle fotovoltaiche al silicio di efficienza corrente (10%) servirebbe una superficie di 10^4 km² di lastre di silicio (12,5 km²/GW), un volume di $2 \cdot 10^6$ m³, e un peso di $4.6 \cdot 10^6$ t di silicio.

Per «visualizzare» l'area a livello italiano, questa corrisponderebbe grosso modo alla superficie della Lombardia.

Come abbiamo visto, attualmente una frazione molto elevata delle celle (circa il 35%) è costruita con silicio di grado elettronico (Si-EG) che consente elevate prestazioni: sono state raggiunte efficienze prossime al limite teorico (> 29%) con dispositivi molto sofisticati. Ma il Si-EG è troppo costoso sia dal punto di vista economico (circa 250 \$/kg) che energetico (> 300 KWh/kg). Inoltre la disponibilità di Si-EG per applicazioni fotovoltaiche è limitata dalla concorrenza del mercato della microelettronica.

Si può prevedere che questa frazione diminuirà progressivamente nel tempo, poiché nessun sviluppo del fotovoltaico in campo energetico è compatibile con l'uso di questo materiale, che non consente costi di produzione del KWh confrontabili con quelli del KWh termico o nucleare.

Le alternative attuali all'uso del Si-EG sono il silicio multicristallino in fette e in film, cresciuto a partire da scarti di silicio per elettronica, la cui disponibilità non supera le 3 000 t/anno. In generale questo materiale permette la realizzazione di celle di efficienza prossima a quelle prodotte con silicio per elettronica, ma anche in questo caso uno sviluppo delle



Impianto fotovoltaico da 2 MW installato presso una centrale nucleare defunta in prossimità di Sacramento in California.

produzione a livello delle centinaia o migliaia di MW non è possibile grazie alla limitata disponibilità di scarti. Si deve oggettivamente concludere che sulla base di un'analisi critica della situazione attuale non è possibile il raggiungimento di condizioni di competitività energetica ed economica con il kWh da combustibili fossili anche in presenza di elevati aumenti di produttività e di livelli assoluti di produzione. La possibilità di reale sviluppo e utilizzo del fotovoltaico in campo energetico è quindi associata o alla disponibilità di grandi quantità di silicio di buona qualità (silicio di grado solare) preparato con tecnologie diverse da quelle utilizzate per il silicio di grado elettronico, possibilmente sotto forma di lastre o di nastri per permettere processi di produzione di celle e moduli in continuo; o allo sviluppo di nuove tecnologie, basate sull'uso di substrati a film sottile, tanto da rendere trascurabile il costo del materiale.

Silicio di grado solare o oltre il silicio?

Il silicio di grado solare è ipoteticamente un silicio di grado elettronico, contenente impurezze (e difetti estesi) in quantità, densità (e dimensioni) compatibili per un'applicazione elettronica che non contempla, tuttavia, dimensioni nanometriche dei suoi componenti. Si tratta pertanto di quantificare innanzitutto di quanto possono essere rilassate le proprietà strutturali ed elettroniche di questo materiale e quindi di progettare un processo di produzione che assicuri il raggiungimento della qualità necessaria .

Per raggiungere un'efficienza pari all'80% dell'efficienza di una cella al Si-EG, si può tollerare una concentrazione di qualche parte per milione atomica (ppma) di Ni, Al, Cu e P, di qualche parte per miliardo atomica (ppba) di Co, Fe, Mn e Cr, mentre tutte le altre impurezze devono essere a livelli inferiori di un ppba. Per raggiungere questi livelli di purezza senza utilizzare i processi previsti per la produzione di silicio per elettronica, che consistono essenzialmente nella produzione di clorosilani da silicio metallurgico (che contiene circa 1 000 – 5 000 ppma di impurezze) per reazione chimica con HCl e idrogeno e nella loro successiva purificazione e riduzione a silicio, si prevede di produrre un silicio metallurgico di elevata purezza a partire da materie prime selezionate e di procedere a una sua successiva purificazione mediante tecniche di cristallizzazione frazionata. Questo processo è in fase di attuale sviluppo industriale, dopo che in passato si erano avute le conferme di una sua fattibilità tecnico-economica. Inoltre, la produzione attuale di silicio metallurgico e di ferroleghe è dell'ordine di circa $1 - 2 \cdot 10^6$ t/anno, compatibile con le richieste del mercato fotovoltaico in una fase di grande espansione. Con qualche ottimismo si può ritenere che questa tecnologia potrebbe essere disponibile nel prossimo decennio, garantendo la presenza di almeno un requisito minimo. La gestione di simili quantità di materiale richiederanno tuttavia lo sviluppo di processi innovativi nella fabbricazione di celle, moduli e impianti.

Oltre il silicio?

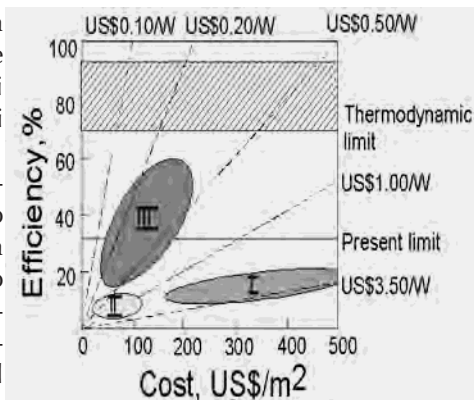
Nella figura a lato sono riportate le previsioni di un'agenzia americana in merito agli sviluppi del fotovoltaico, che mette in evidenza come una sostanziale riduzione dei costi in termini di costo per Watt installato richiederebbe l'uso di sistemi a film sottile.

Risulta difficile associare parametri oggettivi a queste previsioni, che ad avviso dell'autore di questa rassegna, hanno una valenza esclusivamente strategica per gli USA, che a differenza dell'Europa non prevedono l'uso del silicio metallurgico. Lo sviluppo di celle a base di silicio nanocristallino (un sistema bifasico costituito di nanocristalli di silicio in una matrice amorfa) che permettono di ottimizzare il gap del materiale rendendolo più compatibile con lo spettro della radiazione solare incidente e che in dispositivi di laboratorio hanno raggiunto efficienze superiori al 15%, sembrano tuttavia dare segnali positivi in questa direzione. Il risultato di maggior potenziale interesse potrebbe scaturire da una ricerca recentemente condotta da ricercatori dei *Berkeley Labs* in California, che hanno dimostrato come con un opportuno drogaggio il nitruro di gallio presenta un gap limite intorno a 0.7 eV, garantendo la possibilità di sfruttare completamente tutto lo spettro solare. Poiché i nitrucci misti sono in fase di grande sviluppo per applicazioni nel campo delle lampade a bassissimo consumo, un loro uso in campo fotovoltaico sarebbe complementare a quello in campo optoelettronico.

Sia nel caso del silicio nanocristallino che nel caso dei nitrucci, il futuro è tuttavia ancora affidato al successo della ricerca che viene condotta in questo campo.

Conclusioni

Oggi dunque la conversione fotovoltaica non può essere considerata come una fonte secondaria di energia elettrica, perché le sue applicazioni sono marginali da un punto di vista energetico. Inoltre non esistono ostacoli tecnici ed economici alla fattibilità di sistemi fotovoltaici competitivi da un punto di vista energetico, ma esistono vincoli di carattere strategico, che la Commissione Europea sta cercando di rimuovere. Non è ancora chiaro comunque se il futuro privilegerà il fotovoltaico da silicio o il fotovoltaico da film sottili. Poiché al livello attuale di crescita il fotovoltaico continuerà ad avere un ruolo marginale nella politica energetica, sarà comunque necessario uno *shock* come quello degli anni Settanta per attivare un ciclo virtuoso, in grado di utilizzare in pieno le potenzialità del fotovoltaico.



Previsioni di costo dell'energia prodotta da un sistema fotovoltaico in funzione dell'efficienza. I. celle della generazione attuale; II. celle a film sottile attualmente in fase di sviluppo; III. celle a film sottile di tipo avanzato (disponibili dopo il 2020).

Conversione fotovoltaica

A differenza della fotosintesi, che è un processo quantistico a molti livelli, cui è fondamentalmente legata la membrana cellulare, un convertitore fotovoltaico è un convertitore quantistico a soli due livelli, che è in grado di trasformare l'energia solare direttamente in energia elettrica, utilizzando un materiale particolare (un semiconduttore) in cui a seguito dell'assorbimento di un fotone di energia $h\nu$ (h - costante di Plank e ν - frequenza della radiazione) si genera una coppia di cariche di segno opposto, elettroni negativi (e^-) e lacune positive (h^+ dall'inglese hole):

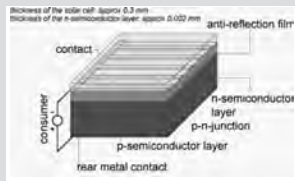
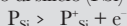
$$h\nu > e^- + h^+$$

Separando opportunamente le cariche è possibile ottenere direttamente energia elettrica.

Come è noto, la realizzazione di celle fotovoltaiche è possibile grazie alle proprietà dei semiconduttori. E' possibile, mediante l'inserimento nel semiconduttore di atomi di impurezza (detti droganti) di caratteristiche opportune, ottenere materiali con proprietà elettriche particolari. Si possono ottenere materiali in cui sono presenti impurezze cariche negativamente e portatori di carica positivi, le lacune (e in questo caso il materiale è convenzionalmente detto di tipo p), o impurezze cariche negativamente e portatori di carica negativi, gli elettroni (e in questo caso il materiale è convenzionalmente detto di tipo n). Questo fatto permette lo stabilirsi di un campo elettrico localizzato in corrispondenza di una giunzione realizzata fra un semiconduttore di tipo p e uno di tipo n (detta comunemente giunzione p-n). Prendendo in considerazione il silicio (Si), che come vedremo è il candidato più favorito come materiale di base per l'utilizzo su larga scala della conversione fotovoltaica, un tipico drogante p è un atomo di boro (B) che sostituisce un atomo di silicio (B_{Si}):

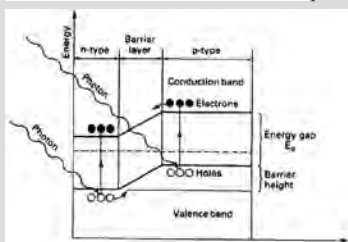


mentre un atomo di fosforo (P) che sostituisce un atomo di silicio (PSi) è un tipico drogante n:



Una rappresentazione schematica di una cella solare è riportata nella figura, che mostra come essa sia costituita da una base di silicio n, da uno strato sottile di silicio p ad essa sovrapposto, da un contatto continuo sul retro, da un contatto a barre sul fronte, per lasciare esposta la maggior parte della superficie alla radiazione solare, e da un film sottile con proprietà antiriflettenti per impedire che parte della radiazione incidente venga retroriflessa.

Si veda il particolare del contatto fronte, costituito da una griglia metallica che lascia scoperta la maggior parte possibile della superficie

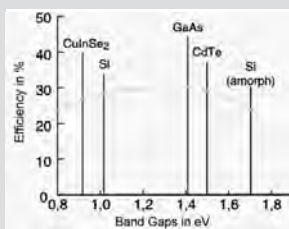


Come si osserva meglio nella figura a lato che rappresenta la struttura elettronica di una cella solare, i fotoni incidenti generano coppie di cariche la cui ricombinazione è impedita dalla presenza del campo elettrico in corrispondenza alla giunzione. Le cariche separate dal campo danno origine a una corrente elettrica di intensità direttamente proporzionale al numero di cariche generate istantaneamente nel sistema dall'assorbimento di radiazione luminosa.

Un convertitore fotovoltaico presenta limiti fisici all'efficienza (η) diversi da quelli di una macchina di Carnot, in quanto essi dipendono dal meccanismo di generazione e di ricombinazione delle cariche nel semiconduttore, che è caratterizzato da una banda di energie proibite E_g (dall'inglese *energy gap*). Per il silicio: $E_g = 1.1$ eV a temperatura ambiente ($T \sim 300$ K).

Il limite fisico all'efficienza è definito da tre variabili con le dimensioni di una energia (l'energia termica del Sole kT_s , l'energia termica della cella kT_c , l'*energy gap* del conduttore $E_g = h\nu_0$) e da una variabile che dipende dal materiale; quest'ultima è la probabilità t_s che un fotone con energia maggiore di E_g produca una coppia elettrone - lacuna.

Si può dimostrare che l'efficienza η dipende solo dai rapporti $x_g = E_g/kT_s$ e $x_c = T_c/T_s$, e da t_s ; si dimostra inoltre che t_s deve essere eguale a 1 perché si raggiunga l'efficienza massima $\eta(x_g)$ che, per un dato semiconduttore, dipende solo dalle caratteristiche della radiazione.



Nella figura a lato, che rappresenta l'andamento dell'efficienza teorica in funzione dell'*energy gap* del semiconduttore utilizzato per la costruzione della cella è riportata con una linea curva l'efficienza massima di conversione dell'energia solare in funzione dell'*energy gap* del semiconduttore. La figura mostra come l'efficienza massima caratteristica di alcuni semiconduttori di interesse applicativo in campo fotovoltaico varia fra il 25% e il 30%.

Si può anche dimostrare che la massima energia generata da un sistema fotovoltaico che capta la luce sotto un angolo di 180° è data dall'equazione seguente

$$E_{max} = E_g (1 - T/T_s) - kT \ln(p/v_s)$$

dove E_g è l'*energy gap* del particolare semiconduttore usato, $(1 - T/T_s)$ è l'efficienza di Carnot (95%) e v_s è l'angolo sotteso dal Sole (0.5°).

Si vede pertanto che l'energia massima «estraibile» è definita, come ovvio, dai vincoli del secondo principio della termodinamica, mentre l'efficienza del processo dipende dalla natura del materiale e dall'energia e dal flusso della radiazione incidente.