

LA SITUAZIONE DEL FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE

Domenico Coiante

18 Maggio 2008

pubblicato su www.aspoitalia.net

d.coiante@libero.it

Introduzione

La Boeing Spectrolab è una delle industrie fotovoltaiche storiche statunitensi. Infatti, essa fu fondata nel 1956 con lo scopo di studiare e produrre celle fotovoltaiche per gli usi spaziali. E' nota soprattutto per il suo pluriennale impegno nella realizzazione di celle multigiunzione ad alto rendimento con semiconduttori composti. Nel dicembre del 2006 la Spectrolab ha annunciato di aver ottenuto il record assoluto del 40.7% per l'efficienza di conversione con una cella a giunzione tripla da 1 cm² sottoposta ad un'illuminazione concentrata pari a 240 soli e raffreddata alla temperatura costante di 25 °C durante la misura (www.spectrolab.com). Il record, che è stato successivamente certificato nel luglio 2007 dal National Renewable Energy Laboratory, conclude una lunga serie di risultati da primato ottenuti negli anni trascorsi prima con celle a giunzione semplice ad arseniuro di gallio e poi a giunzione doppia e tripla utilizzando GaAs e fosforo di gallio e indio. L'importanza di questo record risiede nella dimostrazione sperimentale delle potenzialità offerte dalla tecnologia fotovoltaica circa la possibilità di produrre sempre più grandi quantità di energia elettrica solare occupando sempre minori quantità di suolo. Infatti un semplice calcolo mostra che, mentre con una efficienza del 10% occorrono 10 m² di moduli PV per generare 1 kWp, con il 40% ne bastano soltanto 2.5 m². Quindi, a parità di potenza generata, si può ottenere una riduzione ad 1/4 della superficie di terreno occupato dagli impianti realizzando così un notevole risparmio di suolo.

La struttura della cella tripla del nuovo record è indicata in modo schematico nella Fig.1.

Fig.1 – Rappresentazione indicativa (non in scala) di una sezione trasversale della cella a giunzione tripla della Spectrolab che ha ottenuto il record di efficienza del 40.7% sotto illuminazione di 240 soli. (A/R sta per strato antiriflesso). (Fonte: www.spectrolab.com , data sheet UTJ solar cells)



La radiazione solare concentrata incide dall'alto sullo strato antiriflesso e penetra all'interno della prima cella a fosforo di gallio ed indio. Qui la componente violetta/blu della luce viene assorbita e convertita in elettroni e lacune, mentre le altre componenti dello spettro solare proseguono il cammino attraverso lo strato a giunzione tunnel fino alla seconda cella, quella ad arseniuro di gallio, che assorbe la componente gialla/verde convertendola in elettroni e lacune. La restante parte rossa dello spettro attraversa il secondo strato tunnel e viene assorbita dalla terza cella, quella al germanio, dove realizza l'ultima parte della conversione fotovoltaica. Gli strati di separazione tra le celle, che abbiamo chiamato giunzioni tunnel, sono realizzati con film di materiali speciali di spessore molto sottile cosicché essi possono essere attraversati dai portatori di carica per effetto tunnel. In questo modo essi riescono a giungere sui contatti di raccolta della corrente senza subire perdite. Lo spessore totale del dispositivo è

determinato per la maggior parte dal substrato di germanio, che è di circa 140 micron. Le altre strutture sono realizzate su tale strato per deposizione in film sottili da fase vapore di composti metallorganici. Lo spessore aggiunto dai vari strati fotosensibili si aggira in tutto intorno a qualche micron.

Il valore eccezionale del record ha richiamato l'attenzione degli operatori fotovoltaici su alcuni altri risultati notevoli conseguiti già da qualche anno dalla Spectrolab nella produzione in serie di celle a giunzione tripla per applicazioni terrestri. Da qualche tempo, infatti, celle standard da 1 cm² (CDO-100) vengono ormai prodotte in grande quantità con un'efficienza media del 37%, misurata a 25 °C e a 500 soli, e con una curva di dispersione della produzione fatta a campana, con ampiezza che va dal 36.5% al 37.5% a metà altezza. Le celle sono messe in vendita a 10 \$ ciascuna per ordini di grandi quantitativi e a 14 \$ se montate già sul supporto metallico predisposto per il raffreddamento. Vengono anche offerte celle da 2.2 cm² con efficienza media pari a 36.5% a 25 °C e 500 soli.

Poiché il supporto di raffreddamento è sicuramente necessario per il funzionamento della cella, consideriamo il prezzo di 14 \$ al cm² come riferimento. Per capire che cosa ciò significhi in termini di costo dei materiali e delle tecnologie utilizzate per la realizzazione, facciamo il confronto con il costo delle migliori celle al silicio monocristallino, quelle con efficienza del 20% che già incapsulate nei moduli costano circa 1000 \$/m² (Sun Power Corporation), cioè 0.1 \$/cm². Pertanto il costo delle celle a giunzione tripla della Spectrolab è circa 140 volte più alto di quello delle celle al silicio. Risulta allora chiara la necessità di ricorrere alla tecnica di concentrazione della luce solare in modo da ridurre il costo unitario della potenza generata. Da questo semplice esempio si ottiene pure una stima del valore del fattore di concentrazione necessario per potersi confrontare con i costi della potenza. Infatti al costo delle celle occorre poi aggiungere il costo del sistema di concentrazione e di raffreddamento, per cui un semplice fattore di 140 non basta per rientrare dai costi, ma occorre andare su valori superiori a 250 soli. La stessa Spectrolab consiglia un fattore di concentrazione intorno ai 500 soli, se si vuole entrare nel campo della competitività del costo dei kWh prodotti (ovviamente in condizioni di adeguata insolazione).

E' proprio quest'ultima possibilità che ha suggerito alla australiana Solar Systems un'iniziativa industriale, fino a poco tempo fa impensabile per via dei costi proibitivi: la realizzazione di un impianto da 154 MWp connesso alla rete elettrica nazionale (154 MW Victorian Project) (www.solarsystems.com.au). La centrale utilizza moduli composti di celle multigiunzione ad alta efficienza della Spectrolab appositamente realizzati dalla Solar Systems in Australia. Ciascun modulo è montato sul ricevitore di un eliostato parabolico a specchi a fuoco puntiforme, che concentra la radiazione solare di un fattore pari a 500 soli. La centrale è in costruzione e verrà completata entro il 2013, ma la sua prima sezione entrerà in esercizio nel 2010. Si tratta indubbiamente di un'impresa innovativa molto audace che merita qualche nostra riflessione, soprattutto per i risvolti che essa suscita riguardo al confronto con il solare termodinamico a concentrazione.

Fotovoltaico a concentrazione e costo del kWh

Il fattore di concentrazione, "C", di un sistema ottico per la concentrazione della radiazione solare è definito come il rapporto tra l'area di apertura della superficie captante (lenti o specchi), "A", e l'area su cui viene focalizzata l'immagine del sole, "a". Pertanto, poiché "A" è sempre maggiore di "a", si ha:

$$C = A/a > 1 \quad (1)$$

Sia I_1 l'intensità della componente normale della radiazione solare che incide sull'area di apertura del concentratore espressa in kW/m². Allora l'intensità I_2 della radiazione che incide sulla cella sarà pari a $(\eta_{opt} * C * I_1)$, dove (η_{opt}) rappresenta l'efficienza di raccolta ottica del concentratore. Supponiamo che "a" coincida con l'area del dispositivo di conversione fotovoltaica (cella multigiunzione o modulo composto da celle multigiunzione). La potenza incidente sulla cella sarà allora $(\eta_{opt} * a * C * I_1)$ e questa potenza subirà la conversione fotovoltaica, dando luogo in uscita dalla cella ad una potenza elettrica P_{out} pari a:

$$P_{out} = \eta * \eta_{opt} * a * C * I_1 \quad (2)$$

Dove η rappresenta l'efficienza di conversione della cella in condizioni operative. Ricordando la definizione di C , la (2) può essere anche scritta come:

$$P_{out} = \eta * \eta_{opt} * A * I_1 \quad (3)$$

Poiché $(A * I_1)$ rappresenta la potenza della radiazione che incide sul concentratore, la relazione (3) equivale a dire che il concentratore si comporta come un dispositivo di area A che converte la radiazione in elettricità con un rendimento pari a $(\eta * \eta_{opt})$. Tale efficienza coincide praticamente con quella della cella fotovoltaica, dato che $(\eta_{opt} \cong 1)$ in un buon concentratore. In conclusione, perciò, abbiamo la stessa potenza di uscita che si avrebbe da un modulo fotovoltaico di area "A" e di efficienza η in condizioni di illuminazione normale con la differenza che tale potenza è ottenuta impiegando una sola cella o un modulo di area molto più piccola.

Immaginando di avere davanti a noi un sistema fotovoltaico a concentrazione, facciamo l'elenco dei costi dei suoi componenti.

1. Cella fotovoltaica ad alta efficienza (o modulo)
Se il costo della cella è C_a in euro/m² e la sua area sensibile è pari ad "a" m², il suo costo sarà pari a $(C_a * a)$.
2. Struttura elettromeccanica del concentratore capace di inseguire la posizione apparente del sole su due assi (eliostato)
Se il costo per unità di apertura del sistema ottico è C_{st} e l'area di apertura del concentratore è pari ad A m², allora il suo costo sarà pari a $(C_{st} * A)$.
3. Terreno su cui è realizzato l'impianto
Se il costo unitario del suolo è C_t euro/m² e se si tiene conto del fatto che per evitare l'ombreggiamento reciproco tra gli eliostati occorre ampliare la superficie occupata di un fattore almeno di 3.5 rispetto all'area d'apertura del concentratore, si ottiene un costo totale per il suolo pari a $(3.5 * A * C_t)$.
4. Inverter DC/AC
Il suo costo sarà dato da $(C_p * P_{out})$, dove C_p è il costo per unità di potenza (in euro/kW) e (P_{out}) è la potenza massima di uscita dal concentratore in kW inviata all'inverter.

Pertanto il costo totale da finanziare per l'impianto sarà dato da:

$$(CT) = (C_a * a) + (C_{st} * A) + (3.5 * A * C_t) + (C_p * P_{out}) \quad (4)$$

La spesa annuale da sostenere per ripagare tale costo a rate costanti sarà data da $(FCR * CT)$, dove FCR contiene il fattore di annualità per la restituzione del finanziamento al tasso d'interesse corrente e gli altri obblighi finanziari come le tasse dirette sulla produzione, ecc. A questa spesa annuale infine si dovrà aggiungere quella sostenuta per l'esercizio & manutenzione, che sarà pari a

$C_{e\&m} * A$, dove $C_{e\&m}$ rappresenta il costo annuale unitario sostenuto per l'esercizio e la manutenzione dell'impianto. In definitiva, la spesa annuale sostenuta sarà:

$$SA = FCR * (C_a * a + C_{st} * A + 3.5 * A * C_t + C_p * P_{out}) + (C_{e\&m} * A) \quad (5)$$

Per quanto riguarda la produzione annuale di energia (AEP), si ottiene subito dalla (3) come:

$$AEP = \eta_i * P_{out} * H = \eta_i * \eta * \eta_{opt} * A * I_1 * H \quad (6)$$

Dove η_i rappresenta il rendimento dell'inverter e H rappresenta la produttività del sito espressa in ore equivalenti alla piena potenza.

Pertanto, se esprimiamo l'intensità della radiazione incidente I_1 in kW/m^2 , avremo che il costo di produzione del kWh sarà dato dal rapporto SA/AEP , cioè dalla seguente relazione:

$$C_{kWh} = \frac{FCR * (C_a * a + C_{st} * A + 3.5 * A * C_t + C_p * P_{out}) + (C_{e\&m} * A)}{\eta_i * \eta * \eta_{opt} * A * I_1 * H} \quad (7)$$

Con qualche passaggio algebrico dalla (7) si ottiene un'espressione che mette in evidenza il ruolo del fattore di concentrazione C :

$$C_{kWh} = \frac{FCR * (C_a / C)}{\eta_i * \eta * \eta_{opt} * I_1 * H} + \frac{FCR * (C_{st} + 3.5 * C_t) + C_{e\&m}}{\eta_i * \eta * \eta_{opt} * I_1 * H} + \frac{FCR * C_p}{\eta_i * H} \quad (8)$$

Espressione semplificata

Per semplificare l'espressione (8), conviene cominciare a fissare il valore attuale dei parametri più conosciuti.

- **FCR**) Consideriamo un tasso d'interesse reale pari al 5%, un ammortamento del debito in un tempo pari alla vita operativa dell'impianto stimata in 20 anni e un rateo delle tasse dirette pari al 20%. Per tali condizioni si ha: $FCR = 0.11$.
- **C_a**) Come già abbiamo detto il costo della cella da 1 cm^2 a giunzione tripla montata sul supporto per il dissipatore costa 14 \$, cioè 9.0 euro (1 euro = 1.55 \$). Pertanto si ha: $C_a = 9 \cdot 10^4 \text{ euro/m}^2$.
- **C_{st}**) Stabilire il costo dell'eliostato è molto difficile perché tale informazione non si trova pubblicata. Ci può servire da guida il fatto che il costo dei sistemi ad inseguimento per i pannelli fotovoltaici piani viene indicato come maggiorazione del 15% sul costo degli impianti fissi. Poiché tale costo si aggira sui 6000 euro/kW, cioè circa 750 euro/ m^2 per efficienza dei moduli del 12%, avremo un costo del sistema a inseguimento di circa 112 euro/ m^2 . Per i concentratori occorre poi effettuare notevoli aggiunte di costo: quelle dovute agli specchi, quelle dovute alla necessità di irrobustire tutta la struttura per sostenere il peso degli specchi ed infine quelle del sistema di raffreddamento (quasi sempre a circolazione forzata di un fluido) necessario a mantenere entro limiti di sicurezza la temperatura operativa delle celle. Tenendo conto che un rapporto consuntivo di R. Edgar dei Sandia Laboratories del 2001 (www.sandia.gov/renewableenergy/solarthermal) indicava il costo di 375 euro/ m^2 per gli eliostati a

specchi dell'impianto solare termodinamico Solar Two, potremo considerare abbastanza adeguato un costo attuale: $C_{st} = 250$ euro/m².

- **C_t**) Consideriamo un sito in una zona arida dell'Italia meridionale. Il costo del terreno attrezzato per ricevere gli eliostati sarà da stimare all'incirca come: $C_t = 2.5$ euro/m².
- **C_{e&m}**) Il rapporto citato sopra indicava un costo annuale per esercizio e manutenzione per la centrale Solar Two di circa 25 \$/m² e proiettava tale costo per gli impianti di seconda generazione intorno ai 10 \$/m². Considerato il fatto che un impianto fotovoltaico a concentrazione è molto più semplice, non avendo tutta la parte termoidraulica e termoelettrica, e tenuto conto che il costo di manutenzione degli impianti fotovoltaici fissi si aggira intorno a 1-2 euro/m², sembra ragionevole assumere un costo pari a: $C_{e\&m} = 4$ euro/m² all'anno.
- **C_p**) Il costo dell'inverter è un dato abbastanza noto, che si può desumere dai prezzi di listino pubblicati sulle riviste. Tali prezzi vanno da circa 400 a circa 1000 euro/kW a pezzo. Considerando l'acquisto in quantità, assumiamo un costo medio: $C_p = 500$ euro/kW.
- **η_i**) L'efficienza dell'inverter si situa intorno a: $η_i = 95\%$.
- **η_{opt}**) L'efficienza ottica del sistema di captazione della radiazione solare in condizioni ottimali si trova intorno a: $η_{opt} = 95\%$.
- **I₁**) L'intensità massima della radiazione solare diretta viene considerata: $I_1 = 1$ kW/m².
- **H**) Nel sito prescelto dell'Italia meridionale (es. Trapani) assumeremo in accordo con l'Atlante Europeo della Radiazione Solare per la componente diretta della radiazione solare un numero di ore equivalenti: $H = 1700$ ore/anno.

Inseriamo i dati numerici nella (8), che diviene:

$$C_{kWh} = 6.45/(C*\eta) + 0.021/\eta + 0.034 \quad (\text{euro}) \quad (9)$$

I tre termini del secondo membro rappresentano rispettivamente il contributo dovuto al costo delle celle, quello comprensivo dell'eliostato, del terreno e dell'esercizio e manutenzione ed infine quello dell'inverter.

Come si può vedere, a efficienza di conversione costante, il primo termine va a decrescere mano a mano che aumenta C. Per valori di C molto grandi, il contributo di costo dovuto alle celle potrebbe divenire addirittura trascurabile in confronto agli altri. Infine al crescere dell'efficienza, si riducono i valori dei primi due contributi. Il terzo contributo, quello di 3.4 eurocents dovuto all'inverter, costituisce il limite asintotico del costo del kWh.

Come gioca il fattore di concentrazione

Oltre a ricoprire un ruolo diretto, C gioca anche un ruolo indiretto attraverso l'efficienza di conversione. Infatti si può dimostrare che η aumenta al crescere del fattore di concentrazione secondo la relazione:

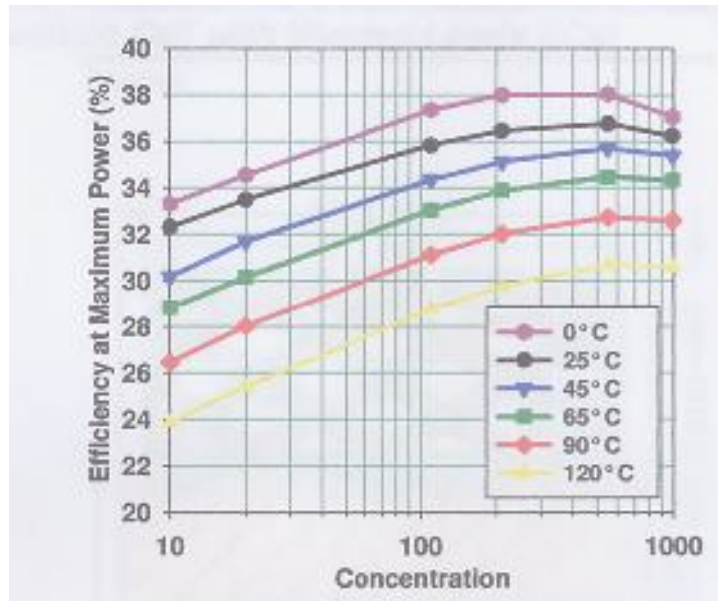
$$\eta = \eta_i * [1 + (kT/qV_m) * \ln(C)] \quad (10)$$

Dove η_1 è l'efficienza a 1 sole, q è la carica dell'elettrone, T la temperatura assoluta della cella, k la costante di Boltzman e V_m è il valore della tensione di uscita della cella nel punto di massima potenza erogata.

Mantenendo la temperatura costante, l'efficienza aumenta secondo il logaritmo del fattore di concentrazione. La Fig.2 mostra l'andamento dell'efficienza di conversione della cella della Spectrolab come viene indicato nelle schede tecniche commerciali. Viene anche mostrato l'effetto di decremento dell'efficienza dovuto all'innalzamento di temperatura.

Fig.2 – Efficienza di conversione della cella commerciale a tripla giunzione della Spectrolab in funzione del fattore di concentrazione e per diverse temperature di funzionamento.

(Fonte: www.spectrolab.com, data sheet CDO-100-IC solar cells)



Come si può vedere, se si vuole la massima efficienza, occorre mantenere bassa la temperatura di funzionamento. A 0 °C si potrebbe ottenere l'efficienza del 38% già con un fattore di concentrazione pari a 200, ma ciò richiederebbe per il raffreddamento una quantità proibitiva di energia. Poiché nella pratica il fluido di raffreddamento dovrà dissipare nell'ambiente il calore asportato dalle celle, dovremo tollerare un certo innalzamento della temperatura rispetto all'ambiente, la cui temperatura nei siti assolati può raggiungere anche i 40-45 °C. Pertanto dovremo operare mantenendo la temperatura massima delle celle intorno ai 60-65 °C. L'efficienza massima in tali condizioni è di circa il 35 % ed essa si ottiene in corrispondenza di un fattore di concentrazione pari a 500 soli. In definitiva, le condizioni operative per il fattore di concentrazione e per l'efficienza saranno pari rispettivamente a $C = 500$ e $\eta = 35\%$. Inserendo questi due valori nella (9) otteniamo infine per il costo del kWh:

$$C_{\text{kWh}} = 0.037 + 0.060 + 0.034 = 0.131 \quad (\text{euro/kWh}) \quad (10)$$

Come si può notare, il contributo maggiore al costo è dovuto al secondo termine, quello che principalmente deriva dai costi dell'eliostato, su cui esiste la maggiore incertezza. **In ogni caso occorre rilevare che il costo di 13 centesimi di euro per kWh risulta meno della metà del costo di produzione del kWh fotovoltaico** a pannelli fissi e che esso comincia ad essere inferiore al prezzo dell'elettricità pagato in bolletta dagli utenti italiani, pari a 18-19 centesimi al kWh.

Confronto con il solare termodinamico

Se rifacessimo il calcolo precedente applicando le condizioni di migliore insolazione che esistono nei siti desertici australiani, troveremmo sicuramente un costo del kWh inferiore ai 10 centesimi e ciò giustifica di per sé dal punto di vista economico l'impresa della centrale australiana di Victoria da 154 MW della Solar Systems. Pertanto sarà molto interessante seguire gli sviluppi sperimentali di questa iniziativa per verificare se i valori che abbiamo assunti per i diversi parametri siano realizzati nella pratica. Se così fosse, avremmo anche la possibilità di effettuare un confronto sul campo con le centrali solari termodinamiche a concentrazione. Infatti, a parte il discorso dell'accumulo termico, ci attira particolarmente la possibilità di semplificare enormemente i sistemi

termodinamici a concentrazione sostituendo idealmente il ricevitore termico con uno a celle fotovoltaiche multigiunzione ed eliminando sia la parte termoidraulica (circuiti termici e scambiatori di calore), sia il gruppo turbina alternatore, ottenendo un'efficienza di conversione totale dal sole all'elettricità superiore al 30% (circa il doppio delle attuali centrali a paraboloidi lineari) con il conseguente dimezzamento dell'area occupata dall'impianto (cosa non da poco).

Detto in altri termini, la disponibilità commerciale per applicazioni terrestri delle celle multigiunzione ad alta efficienza, sviluppate per lo spazio, rimette in discussione le strategie di sviluppo delle centrali solari rispetto alle diverse tecnologie oggi presenti sul mercato. Qualora l'esperimento della centrale fotovoltaica australiana a concentrazione si dimostrasse positivo sul piano economico, sarebbe necessario ripensare completamente al processo di sviluppo delle centrali solari termodinamiche. Infatti la loro efficienza presente (situata intorno al 14-15%) risulterebbe completamente inadeguata a reggere la concorrenza economica. A questo punto, il difficile processo di sviluppo in corso verso le alte temperature, che si è reso necessario per migliorare il ciclo termodinamico ed ottenere una migliore efficienza, potrebbe essere messo in discussione dalla concorrenza con le centrali fotovoltaiche a concentrazione. Infatti, anche a parità di efficienza, queste presentano uno schema di funzionamento molto più semplice, che vede la presenza soltanto del concentratore ottico, del ricevitore fotovoltaico e dell'inverter, senza ulteriori apparati per arrivare all'energia elettrica di uscita.

Ringraziamento

Si ringrazia Francesco Pasqualin, Socio Aspo, per aver segnalato l'iniziativa della Solar Systems ed aver fornito l'indicazione dei siti internet da cui sono state attinte le informazioni di base del presente lavoro.