

## Tecnologie a film sottile per moduli fotovoltaici e prospettive di una start-up

*Marco Bianucci<sup>1,2</sup>, Luca Bonci<sup>1,3</sup>, Alessio Bosio<sup>1,2</sup>, Ciro Lenti<sup>1</sup>,  
Alessandro Romeo<sup>1,4</sup> e Nicola Romeo<sup>1,2</sup>*

Negli ultimi anni il mercato mondiale del fotovoltaico ha avuto una crescita superiore a quella del mercato dell'elettronica con punte oltre il 40%. In Europa, con la direttiva 77/CE/2001, che verrà definitivamente attuata anche in Italia con l'avvio del "conto energia", le prospettive risultano decisamente ancora più incoraggianti. Ma perché l'energia solare fotovoltaica risulti davvero competitiva con quella prodotta dalle fonti fossili è necessario che i moduli vengano fabbricati con una nuova tecnologia, che consenta di abbassare notevolmente i costi di produzione rispetto a quelli dell'attuale, basata sull'uso del silicio. La Solar Systems & Equipments srl ha messo a punto e protetto con brevetti internazionali un processo per la produzione di moduli a film sottile a Tellururo di Cadmio che dovrebbe consentire questo fondamentale passo nella riduzione dei costi di produzione.

<sup>1</sup>Solar Sytsems & Equipments s.r.l., Viareggio (LU)

<sup>2</sup>Dipartimento di Fisica Università di Parma

<sup>3</sup>Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Pisa

<sup>4</sup>Dipartimento di Fisica, Università di Verona

### **Premessa. Necessità dello sviluppo della generazione fotovoltaica di energia**

A parte l'energia nucleare, e quella dovuta alla radioattività naturale, tutta l'energia disponibile sulla Terra deriva dal Sole e arriva sul nostro pianeta sotto forma di radiazione elettromagnetica (luce). Assorbita dalla Terra e dalla sua atmosfera, questa forma di energia si converte poi in calore, generando venti, piogge e correnti, oppure viene immagazzinata, tramite la fotosintesi clorofilliana, nelle sostanze organiche, ovvero nella biomassa, che poi talvolta, accumulatasi localmente per milioni di anni, ha dato origine alle riserve fossili (petrolio, carbone, e gas). La sintesi clorofilliana ha però un'efficienza di conversione della luce in energia chimica (tramite la formazione di sostanze organiche) estremamente bassa, e infatti il consumo energetico attuale non potrebbe essere soddisfatto se non dilapidando le grandi quantità di biomassa fossile formatasi nel corso di intere ere geologiche. Questo porta a due conseguenze gravi:

- Questa riserva di energia è destinata ad esaurirsi rapidamente perché il suo tasso di produzione è enormemente più basso di quello di consumo.
- L'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) sottratta a poco a poco, ma per milioni di anni, all'atmosfera dalla sintesi clorofilliana, e fissata in queste sostanze organiche, viene ora bruscamente liberata di nuovo nell'atmosfera.

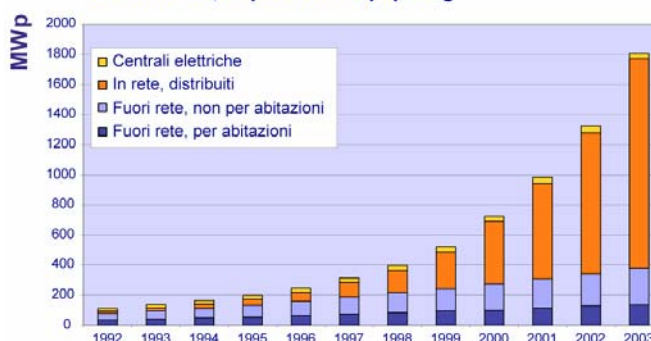
Quand'anche il primo punto, grazie alla attuale grande quantità di riserve fossili ancora disponibili, potesse oggi non preoccupare troppo, il secondo pone degli interrogativi davvero inquietanti sulle sorti del nostro ecosistema. Milioni di anni fa l'atmosfera era ben più ricca di anidride carbonica di quanto non lo sia oggi perciò la temperatura media della Terra doveva essere significativamente più alta dell'attuale, quindi diversi dovevano essere gli equilibri termici e dinamici che si realizzavano sulla Terra: le distribuzioni dei ghiacci ai poli, le correnti marine, i venti e le fasce termiche. L'estrema lentezza del processo di impoverimento di CO<sub>2</sub> dell'atmosfera, dovuto alla sintesi clorofilliana, ha fatto sì che i conseguenti cambiamenti ambientali fossero sufficientemente gradualmente nel tempo, così da permettere alla flora e alla fauna di modificarsi in modo opportuno, seguendo il naturale processo evolutivo di adattamento. Oggi, bruciando enormi quantità di biomassa fossile, stiamo ritornando, ad un ritmo vertiginoso, ai valori di CO<sub>2</sub> in atmosfera presenti in ere geologiche sempre più lontane, e non siamo in grado di valutare le conseguenze di un cambiamento così repentino, anche se è facile prevedere che potrebbero essere disastrose per le specie attuali.

Se non possiamo basarci solo sulla fotosintesi clorofilliana per catturare l'energia solare e se, d'altra parte, dobbiamo soddisfare il nostro crescente fabbisogno energetico, abbiamo la necessità di trovare una forma di conversione energetica più efficiente, che ci consenta di ottenere una quantità di energia immediatamente sufficiente e adeguata alle nostre esigenze. L'odierna tecnologia ci permette di realizzare dispositivi che hanno questa caratteristica: i moduli fotovoltaici, capaci di trasformare efficientemente la luce solare direttamente in elettricità. Ma allora, perché non siamo ancora invasi da questi dispositivi che ci libererebbero dalla dipendenza dalle fonti fossili, che come una droga sta mortalmente minando la salute nostra e di tutta la Terra? Gli ostacoli a questa diffusione sono principalmente di carattere economico, ma noi siamo convinti che i nuovi risultati scientifici e tecnologici, patrimonio del nostro consorzio industriale per l'occasione costituito, consentano di proporre al mercato dispositivi fotovoltaici così competitivi, per efficienza e costo, da consentire di superare rapidamente queste barriere.

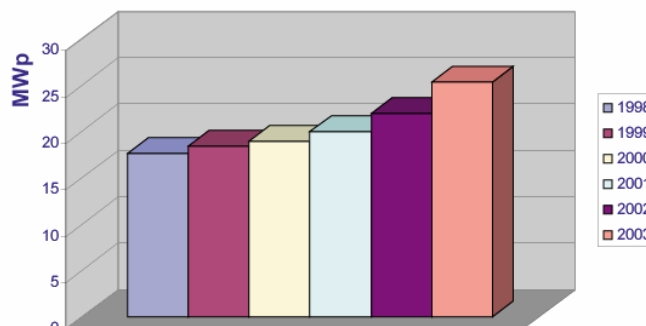
## Competitività dell'energia fotovoltaica. Mercato attuale e prospettive

Fino ad oggi la causa della marginale diffusione dei dispositivi fotovoltaici è stata il loro alto costo. Solo l'intervento pubblico, sotto forma di incentivi economici e campagne di sensibilizzazione, ha consentito un aumento del mercato di questo settore. Sviluppo che sta comunque seguendo ritmi davvero impressionanti: l'incremento percentuale della potenza installata è cresciuto dal 20% del 1994 fino a sfiorare il 40% negli ultimi 3 anni. L'Italia, che nei decenni passati era stata uno dei leader europei del settore, non sta al passo degli altri paesi. Austria, Svizzera, Spagna e Olanda stanno sorpassandoci velocemente, o già l'hanno fatto e allungano rapidamente le distanze. La Germania, da sola, installa quasi 2/3 della potenza europea complessiva. Solo negli ultimissimi anni il mercato italiano ha ricominciato a muoversi, grazie all'iniziativa dei "10.000 tetti fotovoltaici". Una iniziativa comunque marginale rispetto a quanto fatto in altri paesi.

Potenza totale installata nel Mondo fino al 2003  
Da IEA-PVPS, <http://www.iea-pvps.org>



Potenza totale installata in Italia fino al 2003



Ma al di là di questa crescita, ancorché continua e impressionante, la produzione mondiale di energia ottenuta tramite i dispositivi fotovoltaici rimane davvero limitata, corrispondente in pratica a due centrali termoelettriche convenzionali di media potenza.

Per capire davvero le prospettive del mercato del fotovoltaico dobbiamo considerare le novità imminenti, sia di ordine tecnologico che legislativo. Cominciamo da quest'ultimo aspetto.

Con il Decreto Legge 29 Dicembre 2003, n. 387 (G.U. n. 25 del 31.01.2004), l'Italia recepisce la Direttiva europea 77/CE/2001 per la promozione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Il D.Lgs 387/2003 è in pratica una legge quadro che ha bisogno di essere resa

effettiva dall'emanazione di una serie di Decreti Attuativi. Entro il 2005 si attende l'emanazione da parte del Ministero delle Attività Produttive del Decreto attuativo relativo all'art.7 del D.Lgs 387/2003 che introduce il meccanismo d'incentivazione in conto energia per il fotovoltaico, ovvero la possibilità di vendere all'Ente Distributore di energia elettrica l'energia prodotta dagli impianti fotovoltaici ad una tariffa incentivante (il GIFI propone 0,6 euro/kWh per 20 anni). Questa novità consente finalmente di considerare l'installazione di un impianto medio-piccolo (fino a 5kWp) come un investimento con una certa resa nel tempo, indipendentemente dalla propria bolletta elettrica. Infatti l'impianto, indipendentemente dalle sue dimensioni, viene a rendere ogni anno una certa cifra per metro quadrato. Il valore preciso di questa cifra dipende dall'irraggiamento medio del luogo e dall'efficienza del dispositivo fotovoltaico. L'irraggiamento annuale varia da circa 1400 kWh/mq al nord, a circa 1850 kWh/mq al centro fino a oltre 2005 kWh/mq al sud e nelle isole. Considerando un'efficienza del 10%, ogni metro quadrato di impianto produce quindi circa 140 kWh al nord, a 185 kWh al centro e oltre 200 kWh al sud e nelle isole. Se verrà confermato il prezzo di vendita all'Ente di 0,6 euro/kWh abbiamo la resa annuale di 84 euro/mq, 111 euro/mq e 120 euro/mq, al nord, al centro e al sud rispettivamente. I moduli costano circa 500 euro/mq, e quindi in soli 5 anni si recupererebbe la spesa del loro acquisto. Nel costo di un impianto completo però oggi incidono assai anche l'installazione e i vari dispositivi elettrici e elettronici per la connessione in rete, come l'inverter. Per un impianto di 3 kWp (30mq) possiamo stimare sui 7000 euro questi costi, che quindi allungano di altri 2-3 anni il tempo di recupero del capitale investito. Ma una volta passati i primi anni di ammortamento, nei rimanenti anni, fino alla scadenza dei 20 anni di contratto con l'Ente, l'impianto di 30mq frutterà da circa 2500 a circa 3600 euro l'anno, e quindi va considerato a tutti gli effetti come un investimento.

## Quali moduli fotovoltaici?

Gli incentivi sono utili a promuovere la diffusione degli impianti fotovoltaici, ma affinché la produzione di energia elettrica così prodotta possa diventare confrontabile con quella derivante dalle fonti tradizionali, i moduli devono essere fabbricati su scala industriale, con produzioni di decine di chilometri quadrati l'anno. Per raggiungere questo obiettivo i moduli fotovoltaici devono soddisfare quattro requisiti fondamentali:

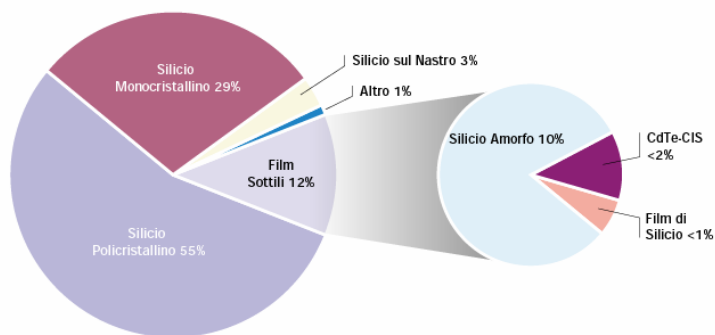
1. essere poco costosi,
2. essere efficienti,
3. essere duraturi,
4. essere stabili nel tempo.

I dispositivi oggi in commercio non riescono a rispondere contemporaneamente a tutti e quattro i requisiti sopra elencati, soprattutto a quello riguardante il costo.

Quindi anche i prossimi incentivi pubblici, seppure contribuiranno ad un ulteriore consistente aumento della diffusione del fotovoltaico sul territorio, senza radicali miglioramenti tecnologici non possono consentire da soli il salto di qualità necessario a rendere effettive le enormi potenzialità di questo mercato.

La grande maggioranza dei moduli fotovoltaici oggi installati viene prodotta con la consolidata tecnologia del silicio monocristallino o policristallino, parente molto stretta della tecnologia utilizzata per la realizzazione dei chip per l'elettronica. Le alte temperature in gioco, la necessità di lavorare in completa assenza di ossigeno e la complessa operazione di taglio e assemblaggio dei "wafer" di silicio, rendono questa tecnologia intrinsecamente complicata e costosa. Ciò nonostante che la tecnologia fotovoltaica del silicio sia sostanzialmente simile a quella dell'elettronica, e quindi notevolmente "matura". Altri dispositivi fotovoltaici basati sul silicio sono prodotti sotto forma di "film sottili": i moduli a silicio amorfo o quelli a nastro di silicio. Ma mentre questi ultimi sono dispositivi ancora allo stadio sperimentale, i primi sono sul mercato ormai da decenni e, col passare del tempo, risulta sempre più chiaro che si tratta di una tecnologia che non manterrà le promesse di evoluzione e sviluppo che l'avevano inizialmente lanciata. Senza ricorrere a dispositivi raffinati, come quelli multi-giunzione il cui costo di produzione è alto, i moduli fotovoltaici a

**Distribuzione percentuale del mercato delle differenti tecnologie per i moduli fotovoltaici all'inizio del 2003**  
Da PV NEWS, Febbraio-Maggio 2003



film sottile di silicio si sono dimostrati in generale poveri in efficienza e poco stabili. D'altra parte il silicio non è una sostanza adatta all'implementazione come film sottile, sia per le difficoltà di lavorazione (necessità di alte temperature) sia per le caratteristiche intrinseche del semiconduttore che, essendo a "gap indiretto", presenta un basso coefficiente di assorbimento della radiazione luminosa e quindi la necessità di essere depositato in strati di spessore rilevante.

Al di là dell'uso del silicio, le tecnologie a film sottile per la fabbricazione di moduli fotovoltaici hanno comunque l'indubbio vantaggio di prestarsi a produzioni su larga scala, in cui il pannello rappresenta lo stato finale di processi in linea e non l'assemblaggio di celle di minor dimensioni come nel caso dei moduli basati sui wafer di silicio cristallino o policristallino. I più elevati tassi di produzione (in termini di metri quadri di moduli al minuto), insieme alle piccole quantità di materiale attivo necessarie, hanno fatto ritenere, fin dagli anni '70 che in futuro a competere con le fonti tradizionali ci saranno proprio questo tipo di moduli.

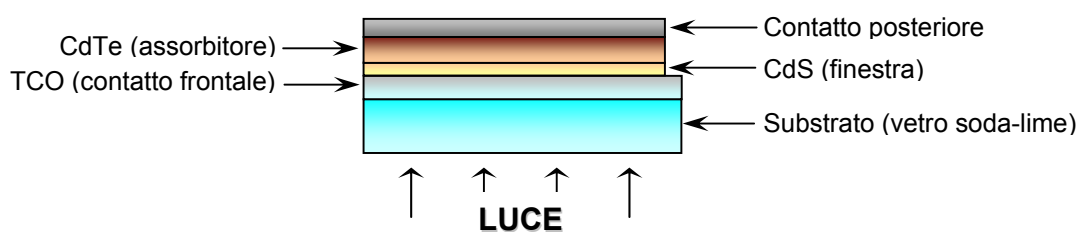
*Noi siamo convinti che i recenti progressi scientifici e tecnologici fatti in questo campo dai ricercatori della Solar Systems and Equipments s.r.l. (SSE), e protetti da brevetti internazionali, consentano di risolvere gli ultimi problemi per la produzione su larga scala di moduli fotovoltaici a film sottili, efficienti, stabili e poco costosi.*

Con questi risultati scientifici e tecnologici abbiamo messo a punto un business plan per la realizzazione di un impianto per la produzione in larga scala di moduli fotovoltaici a film sottile, con un costo iniziale di produzione dei moduli intorno ai 0,8 euro/Wp, che va confrontato con col costo attuale di almeno 3 euro/Wp dei moduli tradizionale al silicio.

Ma entriamo più in dettaglio nella tecnologia sviluppata, che riguarda in particolare le celle a Tellururo di Cadmio.

## Celle fotovoltaiche al tellururo di cadmio (CdTe)

Negli ultimi decenni sono stati introdotti e studiati vari materiali per costituire la giunzione fotovoltaica sotto forma di film sottile, e tra questi i più promettenti sono risultati essere il cosiddetto CIS (diseleniuro di indio e rame) e il CdTe (tellururo di cadmio). In Italia questi due tipi di celle sono stati intensivamente studiati, negli ultimi venti anni, dai ricercatori ora soci della SSE, un lavoro effettuato anche grazie a progetti finanziati dall'Unione Europea. Il risultato conclusivo della ricerca è stata la netta preferenza per le celle basate sul CdTe, che si sono dimostrate di migliore riproducibilità e più adatte a una produzione di tipo industriale a basso costo, principalmente per la semplicità dei processi di deposizione.



Schema di una cella a tellururo di cadmio (CdTe). La zona attiva dal punto di vista fotovoltaico si crea intorno alla giunzione tra il solfuro di cadmio (CdS) e il tellururo di cadmio (CdTe). In pochi micrometri di spessore tutta la luce incidente viene assorbita e trasformata in cariche elettriche.

Il CdTe ha un gap di circa 1,45 eV, è quindi un materiale particolarmente adatto ad assorbire la luce solare. Inoltre è un semiconduttore *a gap diretto*, il che significa, di fatto, che l'assorbimento è molto più efficiente di quanto non avvenga nel silicio. Il coefficiente di assorbimento per la luce visibile è infatti maggiore di  $10^4 \text{ cm}^{-1}$  così che in pochi  $\mu\text{m}$  (millesimi di metro) di spessore vengono assorbiti più del 90% dei fotoni incidenti. Grazie a queste caratteristiche, nonostante che il CdTe sia molto difficile da "drogare" in modo artificiale, ci si può aspettare che celle solari a base di CdTe, illuminate con luce solare, possano arrivare ad efficienze intorno al 20% con densità di corrente dell'ordine di  $27 \text{ mA/cm}^2$  e fotovoltaggio maggiore di 880 mV. Valori ovviamente ancora "teorici".

*Le ricerche condotte dai ricercatori ora soci della SSE hanno portato alla realizzazione su scala di laboratorio di celle fotovoltaiche di circa  $1 \text{ cm}^2$  di superficie con un'efficienza media di oltre il 15%, stabili nel tempo. Il processo di produzione utilizzato consente la completa riproducibilità di celle con queste elevate caratteristiche, superando con successo quello che è il vero punto critico di questi dispositivi.*

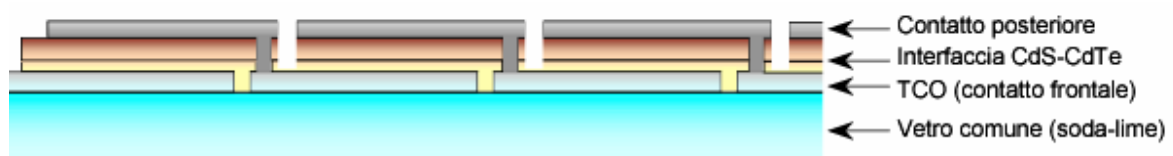
Questo risultato, seppur unico nel panorama mondiale, è ormai acquisito da questo gruppo di ricerca, e certificato sia da un grosso gruppo industriale del settore energia (ABB) che dall'European Solar Test Installation (ESTI), l'obiettivo è quindi ora il passaggio dalla scala di laboratorio alla scala industriale.

### Dal laboratorio alla linea di produzione

Aver risolto in laboratorio il problema della riproducibilità, della stabilità e dell'efficienza su dispositivi di un centimetro quadrato, non implica a priori l'essere in grado di realizzare moduli fotovoltaici con superfici dell'ordine del metro quadro con caratteristiche equivalenti. Ma ciò che in modo particolare, e da sempre, caratterizza l'approccio di laboratorio dei ricercatori ora soci della SSE è il fatto di utilizzare in ogni caso una tecnologia già sfruttata su impianti industriali, ovvero strumenti e macchine di deposizione nate per essere utilizzate su grandi dimensioni. Macchine e processi quindi "intrinsecamente" scalabili, che forse non consentono di ottenere record di efficienza "da laboratorio", ma che, per contro, garantiscono la reale scalabilità a livello industriale dei risultati acquisiti.

Precisato questo importante punto, ritorniamo a sottolineare che la tecnologia dei film sottili ha la potenzialità di essere vincente perché, tra le altre cose, i moduli possono essere prodotti da impianti automatizzati "in linea". Questo significa che si può realizzare una macchina unica, ad una estremità della quale viene inserito un supporto (tipicamente vetro) di dimensioni opportune e che, dopo la deposizione sul supporto di tutti gli strati necessari, all'estremità opposta restituisce il dispositivo finito.

Tipicamente un modulo è costituito da circa 100 celle/metro interconnesse in serie per mezzo di tre tagli eseguiti durante il processo in-line. Le singole celle appaiono come sottili strisce ( $\approx 1$  cm di larghezza) parallele ad un bordo del substrato e connesse in serie le une alle altre in modo sequenziale. Il contatto superiore della cella 1 è connesso con il contatto inferiore della cella 2, il contatto superiore della cella 2 è connesso con il contatto inferiore della cella 3 e così via per tutte le altre celle.

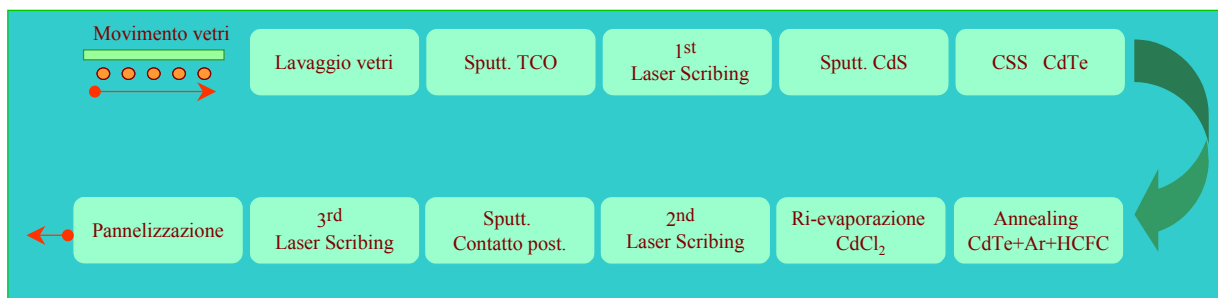


Sviluppando in modo appropriato tecnologie simili a quelle normalmente utilizzate per depositare su vetro film sottili (ad esempio rivestimenti antiriflesso) ci si propone quindi di realizzare impianti industriali per produrre moduli di grosso formato,  $60 \times 120$  cm<sup>2</sup>, alla

velocità di un modulo ogni due minuti circa. In un impianto automatizzato di questo tipo il vetro, trasportato da un nastro, segue un percorso lungo cui è sottoposto ad una serie di processi che vanno dalla pulizia iniziale alla deposizione dei vari materiali che costituiscono il dispositivo fotovoltaico, all'incapsulamento finale. Le varie deposizioni sono intramezzate dai tagli, realizzati con laser, e trattamenti termici effettuati seguendo opportune curve di riscaldamento o raffreddamento.

*I ricercatori ora soci della SSE hanno acquisito un know-how specifico, coperto da brevetti internazionali, relativo alle varie fasi di deposizione che possiamo affermare essere unico e fondamentale per trasferire la produzione dal laboratorio alle dimensioni industriali.*

Che la tecnologia necessaria per realizzare questo impianto sia del tutto standard lo dimostra anche il fatto che non è stato difficile ottenere, da tre diverse aziende, tre proposte dettagliate e le conseguenti offerte finanziarie per l'eventuale realizzazione dell'impianto stesso.



Schema dell'impianto di produzione. L'apparecchio è sviluppato come una singola unità di processo suddivisa in sottounità interconnesse tra loro attraverso la movimentazione automatizzata dei vetri. L'intervento umano si rende necessario solo nel controllo delle procedure e nei test finali dei moduli. Per la realizzazione di questo impianto si può fare ricorso, per un buon numero di unità, a componenti commerciali già presenti sul mercato.

## Business Model

La SSE ha quindi avviato, con altri partner industriali e un partner pubblico, la cosiddetta fase di start-up con la definizione finale e dettagliata dell'impianto produttivo, che sarà situato in un'area del Nord-Est.

Una volta costruito, lo stabilimento, considerando anche l'attuale assenza in Italia di unità produttive di questo tipo, può rappresentare un passo decisivo per l'industrializzazione di un prodotto di cui il mercato ha grande necessità. Si è ipotizzato un impianto di capacità produttiva media, sufficiente a coprire una frazione del prossimo mercato italiano, mercato che si stima possa crescere nei prossimi anni per raggiungere un installato fotovoltaico totale di almeno 200 MW nel 2010. Per avere un'idea dell'ampiezza del mercato cui tali impianti fanno riferimento si può utilizzare il parametro dei Watt installati per abitante<sup>1,2</sup>. Si pensi che ad oggi in Italia la potenza energetica installata derivante da fonti rinnovabili (solare) è di circa 26 MW, ossia 0,45 Wpc (Watt pro capite). In Europa, in cui molti paesi sono fortemente attenti alle energie rinnovabili, alla fine del 2003 si rilevano valori di 2,0 Wpc per l'Austria, oltre 3 Wpc per l'Olanda e addirittura 4,85 Wpc per la Germania. Usando la media di questi valori, e pesando anche la differente esposizione geografica dell'Italia, si può stimare un mercato diretto di almeno 200 MW, ma basterebbe pensare di raggiungere una potenza installata di 2,5 watt pro capite perché il mercato italiano sia valutato in circa 150 MW.

La stima di un mercato da 200 MW installati entro cinque anni, riportata nel citato numero speciale di *Renewable Energy World*, vede l'Italia come secondo mercato europeo, affiancata alla Spagna e preceduta dalla Germania, entro il 2010. Ma la situazione italiana è ancor più interessante visto che tale crescita di mercato prende il via da una situazione attuale in cui le applicazioni fotovoltaiche e le capacità produttive sono praticamente trascurabili (diverso è il caso della Spagna che vanta una capacità produttiva di tutto rispetto), e a breve dovrebbe entrare in vigore il decreto attuativo degli incentivi sul conto energia. Per comprendere meglio queste cifre conviene analizzare le tabelle riportate sotto, (tratte da *Trends In Photovoltaic Applications. Survey report of Selected IEA Countries between 1992 and 2003 - Report IEA – PVPS – 2004*) che mostrano in dettaglio l'installato totale, quello pro capite e quello nel solo anno 2003 per gli stati di rilevanza in campo fotovoltaico.

---

<sup>1</sup> *Trends In Photovoltaic Applications. Survey report of Selected IEA Countries between 1992 and 2003 - Report IEA – PVPS T1 – 12 : 2004*

<sup>2</sup> *Renewable Energy World: Review Issue 2004-2005. James & James Ltd (<http://www.renewable-energy-world.com>).*

**Potenza fotovoltaica installata nel mondo alla fine del 2003.**

Nazione	Totale installato (kW)	Installato procapite (kW)	Installato nel 2003 (kW)
AUS	45.600	2,29	6.500
AUT	16.800	2,05	6.492
CAN	11.800	0,37	1.833
CHE	21.000	2,88	1.500
DNK	1.900	0,35	310
DEU	410.300	4,97	133.000
ESP	28.000	0,68	8.000
FIN	3.400	0,66	357
FRA	21.100	0,35	3.832
GBR	5.900	0,1	1.767
ISR	0.500	0,09	30
ITA	26.000	0,45	4.000
JPN	859.600	6,74	222.781
KOR	6.400	0,13	1.028
MEX	17.100	0,16	950
NLD	45.900	2,83	19.591
NOR	6.600	1,44	231
PRT	2.100	0,2	401
SWE	3.600	0,4	284
USA	275.200	0,94	63.000

Da notare sono i forti incrementi di installazione avvenuti nel 2003 in Europa, Giappone e USA, incrementi che sono proseguiti anche nel 2004 e il basso installato pro capite nazionale rispetto alla media europea (tabella sotto). Per una valutazione complessiva del trend del mercato negli ultimi dieci anni, ricordiamo i grafici dell'IEA già mostrati precedentemente, da cui risulta evidente l'impressionante tasso di crescita che, negli ultimi anni, ha sfiorato il 40% annuo.

**Potenza fotovoltaica totale installata in Europa a fine 2003.**

Nazione	Totale installato (kW)	Installato procapite (kW)
Danimarca	1.900	0,35
Portogallo	2.100	0,20
Finlandia	3.400	0,66
Svezia	3.600	0,40
Gran Bretagna	5.900	0,10
Norvegia	6.600	1,44
Austria	16.800	2,05
Spagna	28.000	0,68
Francia	21.100	0,35
Svizzera	21.000	2,88
<b>Italia</b>	<b>26.000</b>	<b>0,45</b>
Olanda	45.900	2,83
<b>Germania</b>	<b>410.300</b>	<b>4,97</b>
<b>TOTALE UE</b>	<b>592.600</b>	<b>1,34</b>

Per quanto riguarda l'Europa, si tenga presente che il grosso del contributo viene dalla Germania, paese certo non favorito climaticamente. Un adeguamento ai livelli della Germania dei paesi mediterranei porterebbe, da solo, a una esplosione del mercato europeo.

L'impianto che ci prefiggiamo di costruire ha una capacità produttiva massima di quasi 18 MW annui e, pur costituendo in prospettiva il maggior impianto nazionale e avendo in tal modo un'importante valenza economica, si può pensare ad esso come il primo passo verso lo sviluppo di una capacità produttiva assai maggiore, necessaria a soddisfare l'esplosiva crescita del mercato fotovoltaico mondiale. Ma anche senza rifarsi al mercato mondiale basti rilevare che le stime di crescita espresse in precedenza, se rispettate, renderebbero l'impianto in progetto ben lontano dalla possibilità di coprire la domanda nazionale. Si consideri a tal proposito, come un esempio tra tanti, una recente notizia apparsa sulla stampa dopo la definitiva approvazione del protocollo di Kyoto, in cui si citava il progetto "Riviera Solare" della Regione Emilia Romagna<sup>3</sup>, ossia l'intenzione di dotare di impianti fotovoltaici le strutture della riviera romagnola, per un installato totale di 24 MW.

Il tipo di modulo fotovoltaico che sarà realizzato, un pannello di 0,72 m<sup>2</sup> di area, avrà un utilizzo rivolto sia alla piccola industria, sia agli edifici pubblici ed alle utenze domestiche. Questo è il mercato che sta avendo, e si prevede avrà, la crescita maggiore nei prossimi anni. Ferma restando la possibilità di costruire piccole centrali solari elettriche con l'utilizzo dei pannelli prodotti grazie alla realizzazione di questo progetto.

## **Il fattore ambientale**

Un effetto secondario, ma non trascurabile, della realizzazione di impianti per la produzione di moduli fotovoltaici è l'abbattimento di emissioni di gas serra. Tra le energie rinnovabili quella solare, e più precisamente quella fotovoltaica è senz'altro tra le più interessanti per quanto riguarda gli obiettivi di riduzione dell'effetto serra. Se è però ovvio che durante il funzionamento i pannelli fotovoltaici non producono alcun gas, bisogna considerare che essi sono stati costruiti consumando quantità non trascurabili di energia e quindi, almeno fino a quando la gran parte dell'energia sarà prodotta con fonti convenzionali, generando CO<sub>2</sub>. Quello che dobbiamo considerare è quindi un bilancio energetico in cui si confronta l'energia prodotta in tutta la vita del pannello fotovoltaico con quella necessaria alla costruzione del pannello stesso, calcolo che può essere eseguito considerando come grandezza di misura dell'energia l'equivalente in CO<sub>2</sub> prodotta.

---

<sup>3</sup> Si veda ad esempio il sito della Regione Emilia Romagna: <http://www.regione.emilia-romagna.it>

Nell'Europa occidentale il 50% dell'energia elettrica proviene da combustibile fossile non rinnovabile (20% carbone, 20% petrolio, 10% gas naturale) il restante 50% è fornita da impianti nucleari e idroelettrici. L'energia elettrica prodotta da combustibile fossile implica una produzione di gas serra (CO<sub>2</sub>) non facilmente tollerabile dall'ambiente. In particolare stime recenti indicano un fattore di emissione in atmosfera di 570 g di CO<sub>2</sub> per kWh di energia elettrica prodotta in questo modo. Con la presente tecnologia di fabbricazione dei moduli fotovoltaici, il fattore di emissione di CO<sub>2</sub> si riduce a 20-30 g/kWh. Questo dato è stato ottenuto supponendo una vita media del modulo fotovoltaico di 30 anni, efficienza del 10% ed un irraggiamento medio di 1700 kWh/m<sup>2</sup> all'anno (nord Italia e nord Europa). Questa emissione è tutta quanta concentrata nel processo iniziale di fabbricazione del modulo, sia per quanto riguarda i materiali attivi che i materiali inattivi. È ovvio che, una volta costruito, il modulo fotovoltaico rimane completamente passivo dal punto di vista dell'emissione di gas serra. Questo fattore di emissione potrà poi ulteriormente decrescere, nel medio periodo, se si considera un incremento nell'efficienza di conversione dal 10% medio attuale al 15% nel prossimo futuro.

Per confronto il gas naturale, anche se è considerato una sorgente pulita di energia, contribuisce in maniera elevata alla produzione di CO<sub>2</sub>, mentre il nucleare produce da 10 a 100 volte meno gas serra di questo (anche per il nucleare bisogna considerare l'energia consumata per costruire l'impianto e produrre il materiale fissile). Allo stato attuale della ricerca i pannelli fotovoltaici si situano a un valore di *emissione serra* intermedio tra le migliori e le peggiori centrali nucleari<sup>4</sup>, ma entro 20 anni si prevede che la produzione di energia elettrica fotovoltaica e specialmente quella ottenuta tramite moduli a film sottili, diventerà la forma di energia di gran lunga meno inquinante per quanto riguarda l'effetto serra. Va da se che già da ora i rischi ambientali e sanitari legati alla produzione fotovoltaica non sono neanche paragonabili a quelli della produzione per via nucleare.

### **Considerazioni sull'eventuale pericolosità dell'uso del Cadmio nei moduli fotovoltaici a film di CdTe-CdS.**

Moduli fotovoltaici basati sul Tellururo di Cadmio vengono già prodotti in quantità industriali in altri paesi, tra cui gli Stati Uniti, principalmente con la First Solar, e la Germania, con Antec Solar. Queste realtà industriali, e altre che stanno rapidamente emergendo (per esempio Q-cells), stanno costruendo nuovi impianti ad un ritmo impressionante. L'eventuale pur pretestuosa opposizione all'uso dei moduli a base di

---

<sup>4</sup> *Renewable Energy World: Review Issue 2004-2005*. James & James Ltd (<http://www.renewable-energy-world.com>).

CdTe non ci troverebbe quindi isolati nel fare valere le ragioni oggettive della nostra difesa.

Appena si affronta davvero la questione della pericolosità di questi moduli, subito risulta evidente che il problema, se esiste, può essere solo di natura psicologica e/o politica. Per un approfondimento esaustivo su questo argomento rimandiamo al documento "Cadmium Facts and Handy Comparisons" di Ken Zweibel del National Renewable Energy Laboratory (NREL) e di Vasilis Fthenakis del Brookhaven National Laboratory (<http://www.nrel.gov/cdte/>). Citiamo comunque i principali fatti e argomenti:

- a. Il CdTe non è assimilabile al Cadmio metallico, poiché è un prodotto altamente stabile, ad alto punto di fusione e insolubile in acqua<sup>5</sup>. La temperatura che si raggiunge negli incendi delle abitazioni residenziali degli stati uniti, dove vi è molto materiale infiammabile (legno), arriva al massimo a 900°C sul tetto e 1000°C negli scantinati, mentre il punto di fusione di CdTe è a 1041°C e l'evaporazione comincia a 1050°C. Il punto di fusione del CdS è addirittura a 1750°C. Inoltre studi al "Brookhaven National Laboratory" e al "GSF Institute of Chemical Ecology" in Germania hanno indicato che alle temperature tipiche di un incendio i materiali del modulo fotovoltaico rimarrebbero inevitabilmente incapsulati all'interno del vetro fuso. Infine, in caso di incendio di un'abitazione, moltissimi altri materiali comuni sarebbero fonte di rischio incomparabilmente più grande che qualunque potenziale emissione causata dai sistemi fotovoltaici a base di CdTe<sup>6</sup>.
- b. Un modulo a base di CdTe contiene pochissimo Cadmio, meno dell'uno per mille in peso, e meno, per metro quadrato, di un'ordinaria pila al NiCd. Inoltre, come detto sopra, il Cadmio nel modulo è in una forma assolutamente stabile<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> Fthenakis V., Morris S., Moskowitz P., Morgan D. (1999). "Toxicity of cadmium telluride, copper indium diselenide, and copper gallium diselenide." *Progress in Photovoltaics*, 7, pp. 489-497. Bohland J., Smigielski K. (September 2000). "First Solar's CdTe module manufacturing experience: environmental, health, and safety results". Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, AK.

<sup>6</sup> Drysdale D. (1985). "An Introduction to Fire Dynamics", pp. 329-330, Wiley, NY. Moskowitz P., Fthenakis V. (1990). "Toxic materials released from photovoltaic modules during fires; health risks", *Solar Cells*, 29, pp. 63-71. Thumm W., Finke A., Nuemeier B., Beck B., Kettrup A., Steinberger H., Moskowitz P. (1994). "Environmental and health aspects of CIS-module production, use, and disposal." Presented at the First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, 5-9 December 1994.

Steinberger H. (1997). "HSE for CdTe and CIS thin film module operation, IEA expert workshop -Environmental aspects of PV power systems", May 23, 1997, Report No. 97072, Niewlaar E. and Alsema E. (ed.), Utrecht University, The Netherlands.

Patterson M., Turner, A., Sadeghi M., Marshall R. (1994). "HSE aspects of the production and use of CdTe thin film modules." Presented at the 12th European PV Solar Energy Conference.

<sup>7</sup> Anderson B. A. (2000). "Materials availability for large-scale thin film photovoltaics." *Progress in Photovoltaics*, 8, pp. 61-76.

Zweibel K. (1997). "Reducing ES&H impacts from thin film PV." *Environmental Aspects of PV Power Systems*, Utrecht University, The Netherlands.

Zweibel K. (1999). "Issues in thin film PV manufacturing cost reduction." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 59, pp. 1-18.

- c. Nel modulo fotovoltaico il Cadmio legato al Telluro e incapsulato, quindi la tecnologia fotovoltaica fornisce una soluzione efficace per il sequestro del Cadmio.
- d. Meno del 3% del Cadmio attualmente usato in U.S.A. basterebbe per una produzione su grande scala (vari GW/anno) di moduli fotovoltaici a base di CdTe.<sup>8</sup>
- e. E' facile e vantaggioso riciclare completamente i moduli alla fine della loro vita, che comunque è di almeno 25-30 anni. Inoltre, data la loro natura, non è facile per l'utente disperdere i moduli nell'ambiente come succede invece spesso con le pile. Il riciclo dei moduli risolve completamente ogni problema di carattere ambientale.<sup>9</sup>
- f. Il Cadmio è un prodotto secondario dell'estrazione di altri metalli come zinco, piombo e rame. Il Cadmio viene quindi oggi prodotto in grande eccesso e viene perciò in gran parte immesso in discarica. Anche supponendo che le discariche minerarie siano controllate, la trasformazione del Cadmio nello stabile Tellururo di Cadmio e il controllo del ciclo di vita dei moduli, con la possibilità di recupero tramite riciclaggio, rendono sicuramente meno probabile il rilascio di Cadmio nell'ambiente, oltre a fornire un utilizzo ambientalmente vantaggioso del Cadmio stesso (si pensi solo alla riduzione delle emissioni serra legate alla generazione fotovoltaica).

Alla fine, risulta evidente che, paradossalmente, l'utilizzo di moduli al CdTe ridurrebbe in effetti la quantità di Cadmio rilasciata nell'ambiente. Si consideri anche il fatto che il 41,3% dell'esposizione umana al Cadmio deriva dall'utilizzo di fertilizzanti, il 22% dall'utilizzo dei combustibili fossili, oltre il 16% dalla produzione di ferro e acciaio e così via fino ad arrivare a un 2,5% legato dall'utilizzo di prodotti del Cadmio quali le batterie NiCd: non solo i moduli fotovoltaici al CdTe porterebbero sul mercato ancora meno Cadmio di

---

<sup>8</sup> Anderson B. A. (2000). Materials availability for large-scale thin film photovoltaics. *Progress in Photovoltaics*, 8, pp. 61-76.

Cadmium Market Update Analysis and Outlook. (1995). Roskill Information Services Ltd., London, UK.

<sup>9</sup> Bohland J., Dapkus T., Kamm K., Smigielski K. (1998). "Photovoltaics as hazardous materials: the recycling solution." *Proceedings of the 2nd IEEE World Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 716-719.

Fthenakis V. (2002). "Could CdTe PV modules pollute the environment?" Aug. 2002, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973. [www.pv.bnl.gov](http://www.pv.bnl.gov).

Fthenakis V., Eberspacher C., Moskowitz P. (1996). "Recycling strategies to enhance the commercial viability of photovoltaics." *Progress in Photovoltaics*, 4, pp. 447-456.

Fthenakis V., Gonsiorawski R. (1999). Lead-free solder technology from ASE Americas, Workshop Report BNL-67536, Oct. 19, 1999, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY 11973.

Steinberger H. (1997). HSE for CdTe and CIS thin film module operation, IEA expert workshop. "Environmental aspects of PV power systems." May 23, 1997, Report No. 97072, Nieuwaar E. and Alsema E. (ed.), Utrecht University, The Netherlands.

quanto non lo facciano le batterie, ma anzi, alla fine si avrebbe una consistente diminuzione del rilascio di Cadmio nell'ambiente.