



ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



DOSSIER

ENEA PER IL SOLARE FOTOVOLTAICO

Workshop

**IL FOTOVOLTAICO: SVILUPPO DELLA RICERCA
E OPPORTUNITÀ PER L'INDUSTRIA**

13 settembre 2006

Roma

*Ambiente
Energia
Innovazione*



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

DOSSIER

ENEA PER IL SOLARE FOTOVOLTAICO

Anna De Lillo

Workshop

**IL FOTOVOLTAICO: SVILUPPO DELLA RICERCA
E OPPORTUNITA' PER L'INDUSTRIA**

13 settembre 2006
Roma

Si ringraziano:

Luisa Pirozzi

Salvatore Castello

Carlo Privato

Angelo Sarno

Franco Roca

INDICE

1	<i>La tecnologia fotovoltaica a livello europeo</i>	5
1.1	Gli indirizzi dell'Unione Europea	5
1.2	La politica di settore dell'Unione Europea	6
1.3	I grandi attori nel quadro europeo	6
1.4	Un raffronto con il Giappone e gli Stati Uniti	8
1.5	Stato attuale e potenzialità della tecnologia fotovoltaica	8
2	<i>La tecnologia fotovoltaica in Italia</i>	11
2.1	Il passato	11
2.2	Il presente	11
3	<i>La proposta ENEA</i>	13
3.1	Le competenze	13
3.2	Il posizionamento	18

1. LA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA A LIVELLO EUROPEO

Il mercato fotovoltaico (PV) mondiale, che continua a crescere a ritmi del 40% oramai da oltre 5 anni, si sta velocemente diffondendo (fig. 1), in termini sia di distribuzione della potenza installata che di produzione, anche in Europa¹. Questo fenomeno non è casuale: l'Europa si è fortemente impegnata nel settore e i prossimi anni saranno decisivi per lo sviluppo di questa tecnologia che, oltre ai benefici di tipo energetico e ambientale, presenta un elevato potenziale tecnologico in grado di trascinare l'economia.

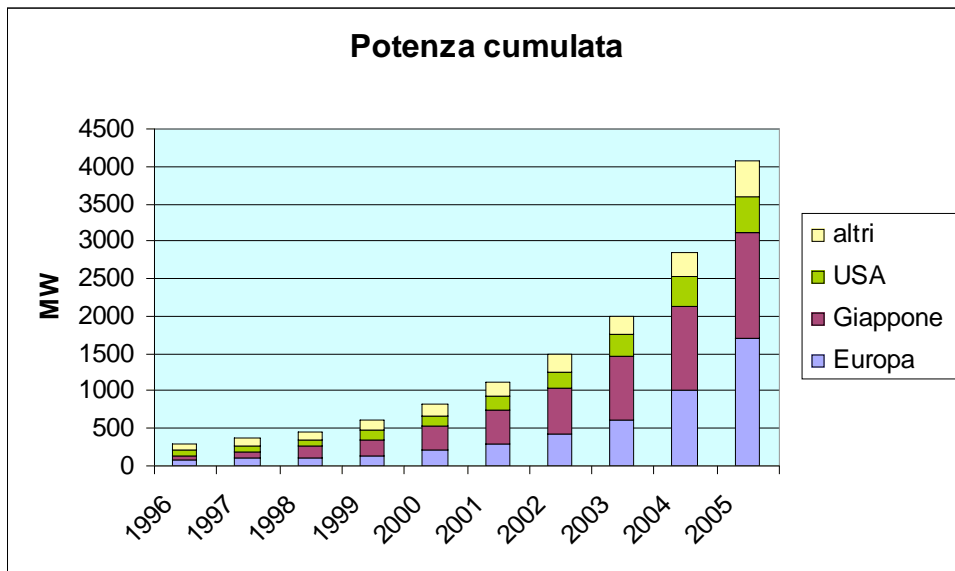


Figura 1 - Distribuzione geografica potenza PV cumulata (Fonte: IEA)

1.1 Gli indirizzi dell'Unione Europea

L'Unione Europea, sin dalla fine degli anni 70, ha promosso attività di ricerca e sviluppo (R&S) nel fotovoltaico allo scopo di rendere tale opzione una reale risorsa energetica e un'opportunità di crescita socio economica. Visti i notevoli risultati ottenuti nell'arco di oltre 20 anni, il Consiglio Europeo ha promosso nel 2003 l'istituzione di una Piattaforma Tecnologica Europea di settore per:

- contribuire ad un rapido sviluppo del PV europeo a livello mondiale per la produzione sostenibile di elettricità;
- coinvolgere gli stakeholders nella formulazione di programmi di ricerca;
- stabilire una stretta connessione e coordinamento tra industria, ricerca e mercato.

Il suo ruolo è di definizione, supporto e accompagnamento per la realizzazione di un piano strategico coerente che prevede di:

- mobilitare tutti i partecipanti per un impegno sul fotovoltaico a lungo termine;
- realizzare la Strategic Research Agenda (SRA) europea per il fotovoltaico della prossima decade e dare raccomandazioni per il suo adempimento;
- assicurare la leadership all'industria PV europea.

¹ L'analisi che segue non tiene conto della Cina il cui mercato interno e la cui produzione nazionale, pur essendo in forte crescita, sono poco note non partecipando la Cina ad alcun organismo internazionale di scambio di informazioni.

Complessivamente l'impegno europeo in termini di finanziamenti alla R&S è prevalentemente rappresentato dalla somma dei finanziamenti e delle attività che ciascun governo autonomamente decide. Pertanto detto impegno, al momento, non implica un'azione coordinata tra i diversi Stati membri.

1.2 La politica di settore dell'Unione Europea

A livello europeo diversi atti legislativi definiscono la politica di settore dell'Unione. In particolare:

- il libro bianco del 1997 pone l'obiettivo di installare 3 GW di potenza fotovoltaica entro il 2010
- il libro verde del 2000 si propone l'obiettivo di raddoppiare il contributo delle rinnovabili dal 6% al 12% entro il 2010
- la Direttiva sulla produzione di energia da Fonti Rinnovabili ha l'obiettivo di portare il contributo delle rinnovabili per la produzione di elettricità dal 14% al 22% entro il 2010.

Gli obiettivi politici di questa azione sono evidenti e sono stati più volte dichiarati:

- diversificare le fonti di energia e garantire la sicurezza negli approvvigionamenti;
- contribuire alla crescita sostenibile dell'economia mondiale e dei paesi in via di sviluppo;
- sviluppare una forte industria high-tech europea nel campo delle rinnovabili ed assicurarne un ruolo preponderante a livello mondiale.

L'impegno europeo, distribuito secondo le possibilità/capacità dei singoli Stati membri, contribuirà a far divenire il fotovoltaico il maggior contribuente alla produzione di energia elettrica nel mondo. L'obiettivo di produrre, entro il 2010, il 22% dell'elettricità da fonte rinnovabile, candida l'Europa quale maggior produttore di energia fotovoltaica.

1.3 I grandi attori nel quadro europeo

La situazione tra i diversi stati membri dell'Unione Europea è molto differenziata ed eterogenea. Le attività di R&S possono essere incluse in programmi più generali sulle rinnovabili (in questo caso il PV deve confrontarsi con le altre tecnologie a meno che non ci siano programmi specifici), oppure essere inserite in programmi il cui obiettivo principale è lo sviluppo tecnologico. Le attività vengono per lo più svolte da enti pubblici di ricerca e università e in parte cofinanziate dai Programmi Quadro della UE.

Gli stati membri che attualmente contribuiscono maggiormente al programma Europeo di installazione sono la Germania e la Spagna (fig. 2).

La Germania, in particolare, è riuscita a dimostrare la sostenibilità di una scelta di questo tipo traendone benefici di tipo ambientale, energetico e sociale nonché un ruolo di leader tecnologico all'avanguardia nel settore. La Germania ha avviato programmi di ricerca sul fotovoltaico già dalla seconda metà degli anni 70 creando laboratori pubblici su attività fortemente innovative. Il programma di incentivazione "100.000 roofs", avviato nel 1999, mostrava un'industria nazionale allineata con quella italiana e circa 3000 occupati nel settore, caratterizzato da:

- produzione wafer silicio 10 MW/anno;
- produzione celle 8 MW/anno;
- produzione moduli 10 MW/anno;
- circa 100 imprese di installazione.

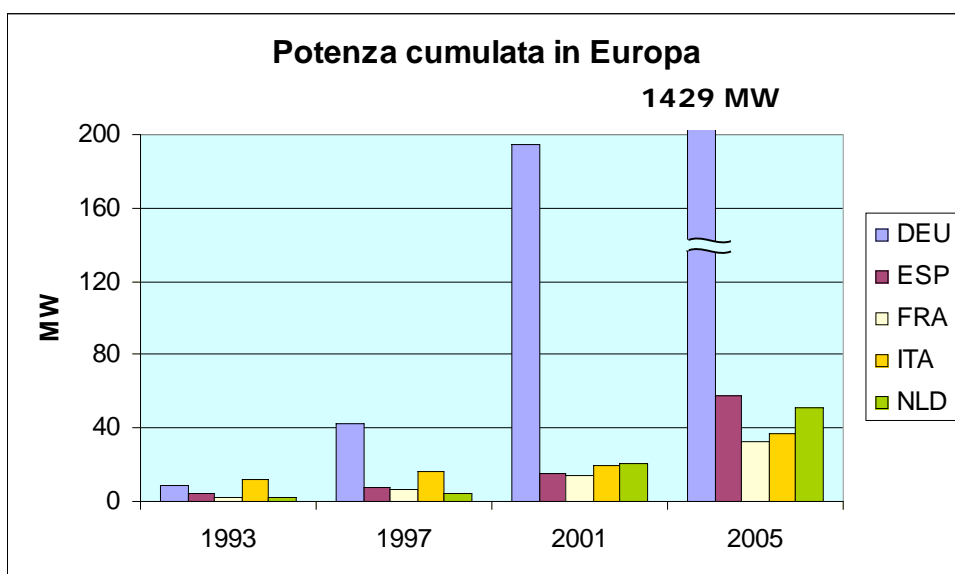


Figura 2 - Distribuzione della potenza cumulata dai principali paesi europei

Nel 2005, a conclusione del programma "100.000 roofs" e all'avvio del nuovo programma di incentivazione in conto energia, gli occupati sono diventati 23.000, le imprese di settore circa 3500 e il fatturato complessivo è pari a 1,8 miliardi di euro. Il settore è così evoluto:

- produzione wafer silicio 360 MW/anno;
- produzione celle 340 MW/anno;
- produzione moduli 360 MW/anno;
- produzione moduli a film sottile (a-Si, CdTe e CIS) 11 MW/anno.

Gli analisti di settore e lo stesso governo tedesco prevedono per i prossimi 5 anni una crescita analoga, con ritmi sempre molto sostenuti (30-40%/anno).

1.4 Un raffronto con il Giappone e gli Stati Uniti

Il governo giapponese ha portato avanti negli ultimi quindici anni una politica di lungo termine che include ricerca e sviluppo, dimostrazione, creazione e sostegno del mercato e promozione. Il programma giapponese "PV2030" ha come obiettivo la realizzazione al 2030 di impianti per una potenza da 50 a 200 GW. Il programma di ricerca e sviluppo è articolato in tre principali obiettivi, tutti finalizzati all'ottenimento della competitività con i costi di produzione elettrica convenzionale: al 2010 la competitività per le utenze domestiche, al 2020 per le utenze commerciali e al 2030 per quelle industriali. Attualmente il sistema incentivante prevede il net metering (0,2 €/kWh) e piccoli prestiti agevolati. In pratica, anche in assenza di incentivazione il mercato continua a crescere ad un tasso di oltre il 20% l'anno.

Negli Stati Uniti il DOE (Department of Energy) gestisce, attraverso il National Center for PV (NREL e Sandia), il programma nazionale di ricerca. Obiettivo prioritario del programma è la formazione di partnership tra industrie, laboratori pubblici e Università. A livello di governo centrale non esiste l'incentivazione al mercato che però è largamente praticata a livello di singoli stati o municipalità con programmi variamente differenziati.

Analizzando i dati resi disponibili dall'IEA sui costi della ricerca sul PV e sul sostegno al mercato (tab. 1), l'Europa ha notevolmente aumentato le spese in R&S ma con una minore efficacia perché il programma complessivo è semplicemente la somma dei singoli programmi nazionali, mentre gli incentivi al mercato sono molto più elevati grazie al programma tedesco che contribuisce per circa il 65% del totale dei costi sostenuti. Anche gli Stati Uniti, dopo un

lungo periodo di stasi, stanno aumentando consistentemente il budget di ricerca sulla tecnologia.

	R&S		Dimostrazione		Incentivazione mercato		Totale	
	2002	2005	2002	2005	2002	2005	2002	2005
Giappone	59	30,1	36	77,9	185	19,2	280	127,2
Europa	58	75	11	15	62	303,5	131	393,5
USA	35	61,4	0	1	80	145,8	115	208,2
Totale	152	166,5	47	93,9	327	468,5	526	728,9

Tabella 1 - Spesa pubblica per il PV in R&S, dimostrazione e mercato negli anni 2002 e 2004 (milioni €) Fonte: IEA-PVPS Annual Report 2002 e 2004

1.5 Stato attuale e potenzialità della tecnologia fotovoltaica

Tecnologie commerciali

La tecnologia del silicio cristallino è oggi la tecnologia dominante nelle applicazioni commerciali (figura 3).

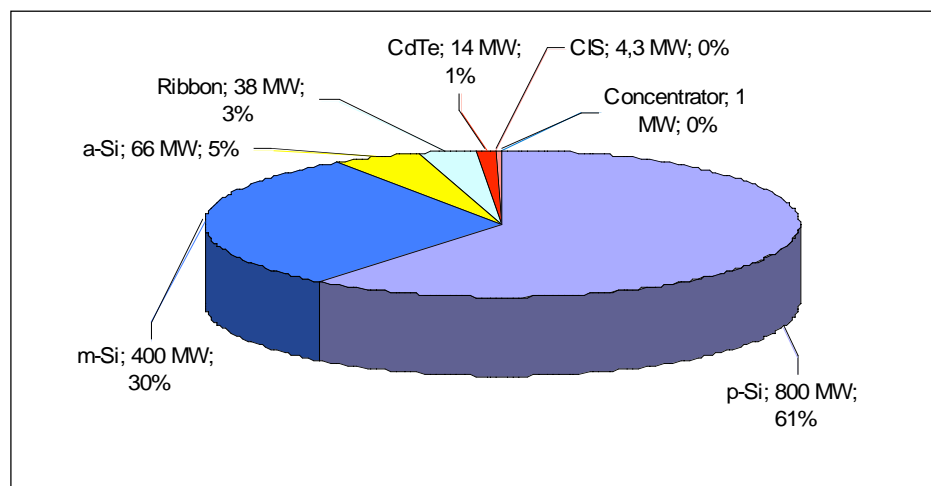


Figura 3 - Suddivisione del mercato per tecnologie

Tutti gli analisti, inoltre, concordano nel ritenere che tale materiale dominerà il mercato per i prossimi dieci anni e, pur essendo una tecnologia consolidata da molti anni, è ancora passibile di miglioramenti che dovrebbero aumentarne l'efficienza (fino al 20%) e diminuirne i costi (fino a 1 €/Wp).

La quota di mercato delle tecnologie a film sottile di tipo commerciale è molto contenuta (7%) anche se tali tecnologie hanno in linea di principio le potenzialità per un impiego del fotovoltaico su vasta scala. La scarsa pratica su linee di produzione di film sottili richiede ancora un grosso sforzo congiunto tra industria e ricerca al fine di completare la conoscenza di tutti i parametri in gioco.

Sebbene da anni siano state proposte soluzioni alternative al silicio cristallino nell'ottica di utilizzare materiali più economici e processi più semplici, il silicio cristallino rimane la tecnologia che ancora attira il maggior interesse dei ricercatori. Circa il 60% dei fondi dedicati alla ricerca PV sono impiegati, a livello internazionale, in attività sul silicio cristallino. L'ottimizzazione di questa tecnologia è infatti ancora argomento di ricerca per i grandi

laboratori internazionali, essendo possibili ancora sensibili riduzioni dei costi e miglioramenti di efficienza. Le proiezioni IEA di sviluppo della tecnologia confermano queste previsioni (grafico 1). La road map IEA prevede ancora nel lungo termine un forte apporto del silicio cristallino il cui costo diminuisce secondo una curva di apprendimento oramai nota e con efficienze via via maggiori.

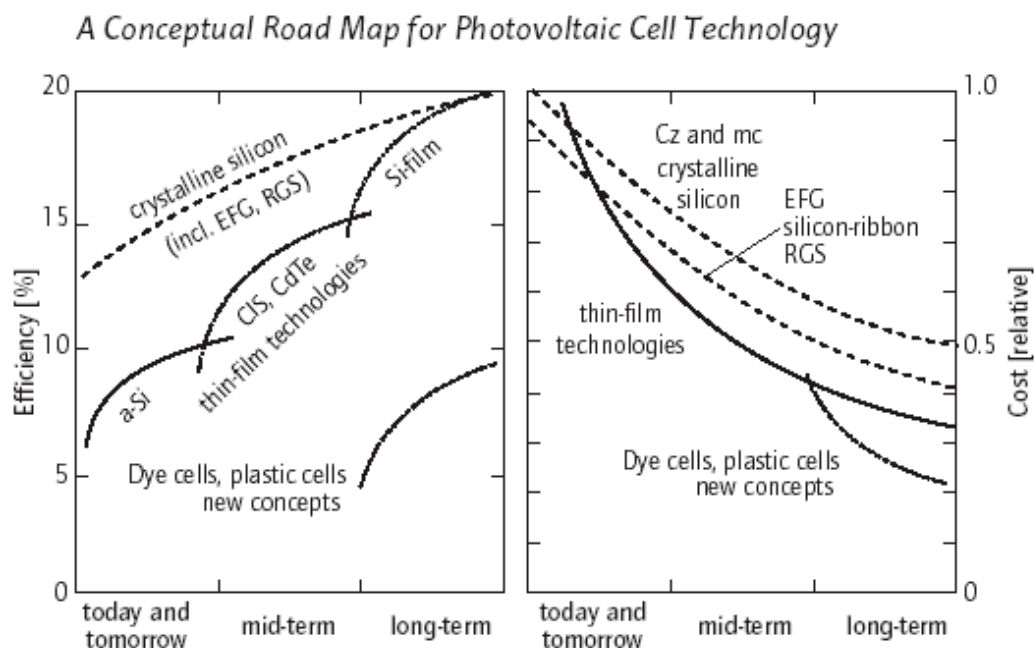


Grafico 1 - Road map IEA

Infine il quadro delle tecnologie commerciali è completato dalla tecnologia della concentrazione che utilizza piccole celle ad altissima efficienza con concentratori ottici di grande superficie e poco costosi. Gli alti costi di sistema (ottica, inseguimento, raffreddamento) sono compensati dall'alta efficienza.

Tecnologie emergenti

A livello di laboratorio esistono diverse nuove tecnologie sostanzialmente basate o sul concetto di basso costo o sull'alta efficienza o su una combinazione delle due. La maggior parte di queste tecnologie richiede ancora forte ricerca di base anche se, per alcune, esistono piccole linee prototipali.

Le nuove tecnologie possono essere suddivise in due grandi famiglie:

- Basso costo:
 - Celle organiche
 - Celle a base di materiali nanostrutturati
 - Celle "dye sensitised"
- Alta efficienza
 - Celle a multigiunzione per la concentrazione
 - Nuovi tipi di conversione.

Alcune tecnologie, quali quelle per le celle "dye sensitised" e quelle a multigiunzione, sono abbastanza mature e già sono in fase di sviluppo preindustriale. La ricerca sulle celle organiche è considerata ad alto rischio ma ad alta potenzialità; ne è stata dimostrata la fattibilità ma con efficienze bassissime e scarsa stabilità.

Le celle nanostrutturate sono particolarmente promettenti perché strati nanostrutturati potrebbero sostituire, a bassissimo costo, il silicio nel processo manifatturiero delle celle e inoltre potrebbero avvantaggiarsi di competenze sviluppate per altri settori.

I costi di produzione delle nuove tecnologie non sono ancora valutabili: tutta l'attività è fortemente orientata sull'efficienza, la stabilità e il tempo di vita.

2. LA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA IN ITALIA

2.1 Il passato

Le istanze energetico-ambientali nate agli inizi degli anni 70 hanno dato l'avvio, a livello mondiale, alle attività di R&S nel settore. Nella prima metà degli anni 80 anche l'Italia, seppure in ritardo rispetto alle altre realtà internazionali, decideva di impegnarsi in attività che si presentavano molto attraenti sia in termini di diversificazione energetica che di impatto ambientale. In considerazione del carattere di ricerca energetica applicata, l'ENEA è stato l'Ente pubblico di ricerca preposto allo sviluppo della tecnologia, anche avvalendosi di collaborazioni su temi specifici con il CNR, l'Università e i laboratori dell'industria nazionale (ENI). L'industria, nel frattempo, aveva dato avvio alla produzione destinata al mercato delle applicazioni di nicchia, da sempre competitive, e della dimostrazione.

Le attività ENEA sono state fin da allora impostate su tre filoni principali:

- ricerca e sviluppo su nuovi materiali e tecnologie di celle e moduli, con particolare enfasi su quelle basate sui film sottili;
- ricerca e sviluppo, in collaborazione con l'industria nazionale, sulle celle al silicio cristallino ad alta efficienza;
- analisi, studio e verifica sperimentale delle prestazioni dei componenti, degli impianti e delle applicazioni PV.

Notevoli investimenti pubblici tra la fine degli anni 80 e la prima metà degli anni 90 hanno consentito lo sviluppo di competenze ad ampio spettro e la messa a punto di laboratori attrezzati con impianti di deposizione e caratterizzazione utili alle diverse esigenze sperimentali.

Contemporaneamente l'industria italiana si collocava tra le prime cinque al mondo e la potenza installata, grazie al programma dimostrativo di ENEL ed ENEA, ci poneva al terzo posto, a livello mondiale, dopo Giappone e USA (California).

Nella seconda metà degli anni 90 si assiste ad un rapido cambiamento delle strategie di promozione del mercato passando da investimenti per realizzare impianti dimostrativi di media-grande taglia a investimenti rivolti alla generazione distribuita, con lo scopo di stimolare con continuità il mercato. Sono di questo periodo i grandi programmi nazionali di Giappone (Sunshine project - 5 GW al 2010), Stati Uniti (Milion solar roofs - 3 GW al 2010) e Germania (programma avviato come 1.000 roof top ampliato poi a 100.000).

È qui che viene meno la coerenza del programma italiano: il ritardo nell'avvio del programma nazionale "Tetti fotovoltaici", soprattutto per la parte gestita dalle Regioni, la scarsa lungimiranza dell'industria nazionale impegnata a rifornire il mercato tedesco che non aveva ancora al suo interno le capacità produttive necessarie a soddisfare la domanda nazionale, interrompono un processo che, con alti e bassi, aveva finalità strategiche sin dall'origine. Le attività di ricerca, oramai concentrate in ENEA e presso poche Università, non trovano il naturale sbocco presso industrie nazionali e, in assenza di un piano strategico nazionale, perdono in coerenza e finalità.

2.2 Il presente

Il programma nazionale "Tetti fotovoltaici", pur nell'incertezza determinata da procedure di autorizzazione abbastanza farraginose, garantisce la realizzazione di circa 20 MW nel periodo 2002-2005. Nel settembre 2005 il Ministero delle Attività Produttive lancia il primo bando per la realizzazione di impianti PV per complessivi 100 MW, distribuiti in varie taglie di impianto, incentivati con il conto energia. Si cerca, in qualche modo, di ripercorrere la strada tedesca. Il bando ha un forte successo di pubblico tanto che, nell'arco di una settimana, vengono presentate circa 3000 domande per complessivi 87 MW. Il bando viene reiterato con ampliamento della potenza installabile a 500 MW. L'industria nazionale continua a latitare mentre si dà l'avvio, mediante bando emesso dalla Regione Lombardia congiuntamente con il Ministero dell'Ambiente e vinto dalla Marcegaglia, ad una iniziativa per

la produzione di celle CdTe (Telluriuro di Cadmio) con tecnologia messa a punto presso l'università di Parma. Inoltre, alcune piccole iniziative, relative a bandi regionali per la competitività delle imprese, si affacciano al mondo industriale anche se timidamente e senza alcun back ground specifico.

A partire dal 2001 l'ENEA, pur proseguendo le attività più tradizionali, avvia un ambizioso programma di ricerca finalizzato allo sviluppo di un sistema fotovoltaico a concentrazione, tecnologia passibile di rapidi miglioramenti tecnologici soprattutto in un periodo in cui la produzione del feedstock di silicio non copre le esigenze delle linee di produzione e i miglioramenti in efficienza delle celle al silicio cristallino fanno ritenere possibile il loro impiego per la concentrazione. Il programma, anche a fronte di buoni risultati tecnici, non trova, almeno a tutt'oggi, partner industriali disposti ad investire nel settore.

I media scoprono il fotovoltaico e, per la prima volta dopo venti anni, se ne parla con un linguaggio vagamente tecnico. Questo produce un effetto "sasso nello stagno", per cui tutti cominciano a parlarne e a cercare informazioni concrete. Come risultato, l'Italia ribolle di iniziative, come master, giornate di studio, tavole rotonde, corsi di specializzazione ecc.

3. LA PROPOSTA ENEA

3.1 Le competenze

Le attività di ricerca ENEA nel fotovoltaico, avviate negli anni 80, sono complessivamente cresciute fino al 2000 con interessi sempre più ampi via via che l'attenzione sulla tecnologia cresceva, sia a livello nazionale che internazionale. Parallelamente, a livello internazionale, si assisteva alla nascita dei più importanti centri di ricerca internazionali del settore: basti citare, a questo proposito, il SERI americano, oggi NREL (National Renewable Energies Labs), il Fraunhofer FhG-ISE tedesco o il NEDO giapponese, per avere una idea di come, a livello mondiale, si giudicasse importante uno sforzo sulla R&S nel campo delle energie rinnovabili, con particolare riguardo al fotovoltaico. A riprova dell'importanza attribuita a queste attività, fu deciso di realizzare il Centro di Portici (nato come CRIF: Centro Ricerche Fotovoltaiche), divenuto operativo nel 1990.

Grazie ai diversi Accordi di Programma con i Ministeri dell'Industria e della Ricerca Scientifica, è stato possibile sviluppare tutte le competenze necessarie a svolgere un ampio programma di ricerca, che ha visto la messa a punto di laboratori attrezzati con impianti di deposizione e caratterizzazione utili alle diverse esigenze sperimentali.

Tali attività hanno favorito la collaborazione con i principali laboratori europei ed internazionali del settore sviluppando, a livello nazionale, le sinergie con i laboratori di ricerca universitari, pubblici e privati.

A partire dal 2000, le attività ENEA, non più finanziate a livello nazionale, hanno subito un graduale decremento in termini sia di risorse finanziarie che umane. Infatti il numero dei ricercatori che era pari a circa 100 unità nel 2000 è gradualmente diminuito: oggi sono presenti circa 50 ricercatori nel settore. Questo fenomeno è chiaramente correlato alla contemporanea carenza di finanziamenti a livello nazionale che ha favorito l'esodo verso altre tecnologie affini. In particolare dagli oltre 30 miliardi annui alla fine degli anni 90 si è passati a circa 4 milioni di euro.

In ENEA sono state sviluppate e studiate tre tecnologie commerciali che possono essere ottimizzate e migliorate in termini di costi e prestazioni. In particolare:

Silicio cristallino

Le attività svolte in questo campo sono finalizzate ad incrementare l'efficienza di conversione di celle al silicio cristallino mediante l'individuazione e la sperimentazione di nuove tecnologie e nuovi processi e/o step di processo suscettibili di essere impiegati in produzione con significative riduzioni dei costi. La gran parte delle attività è stata svolta nell'ambito di Contratti Comunitari che hanno visto la partecipazione dei principali centri di ricerca europei.

Nei laboratori del Centro Ricerche ENEA della Casaccia sono state messe a punto tecniche realizzative del dispositivo basate su tecnologia laser, fotolitografia e serigrafia, oltre, ovviamente, alle principali tecniche di caratterizzazione. Il laboratorio attrezzato con tutte le più importanti facilities tecnologiche e di caratterizzazione, che consentono di processare la cella in modo completo, dal wafer al dispositivo, dispone anche di una piccola linea di produzione prepilota in grado di operare sulle celle commerciali, e di una "clean room" per celle ad alta efficienza. Risultati di rilievo sono:

- o la messa a punto e realizzazione di celle industriali di tipo innovativo al silicio multicristallino di larga area (>100 cm²) con efficienza di cella incapsulata del 17% (più di due punti assoluti superiore ai valori della produzione corrente);
- o La messa a punto e realizzazione di celle al silicio multicristallino di larga area (>100 cm²) a contatti sepolti realizzati via laser e griglia metallica realizzata per serigrafia, con efficienza del 16% (processo unico messo a punto nel laboratorio ENEA, che combina la tecnologia dei contatti sepolti con quello di serigrafia);

- o La messa a punto e realizzazione dispositivi al silicio policristallino sottile (10-20 μm) cresciuto per CVD su substrati a basso costo (ceramica), realizzati con tecniche di drogaggio laser e serigrafia (cella SILA, realizzata nel progetto SUBARO: grandi potenzialità per il distretto della ceramica).

Film sottili

Le due grandi famiglie di materiali impiegabili nei moduli a film sottile sono il silicio amorfo e le sue leghe e i semiconduttori composti policristallini, in particolare CdTe e CIS (o CIGS).

L'ENEA ha sviluppato un ampio programma sul silicio amorfo che sembrava essere il candidato più interessante per la competitività della tecnologia fotovoltaica. Le attività sul silicio amorfo² sono svolte nei laboratori del Centro Ricerche ENEA di Portici e hanno compreso l'allestimento e la messa in opera di molte apparecchiature ed impianti sperimentali, sia di deposizione e caratterizzazione dei vari strati sottili che compongono una cella su diversi tipi di substrato che di realizzazione e caratterizzazione di celle e moduli integrati. Sono stati affrontati tutti gli aspetti relativi allo studio dei materiali: dalle teorie innovative alla modellistica, dalle proprietà opto-elettroniche e strutturali alle tecniche di "light trapping". Sono state poi studiate, progettate, realizzate ed ottimizzate numerose celle solari, tenendo conto della vasta gamma di opzioni tecnologiche disponibili per questo tipo di dispositivi: deposizione di leghe di silicio amorfo di differente tipo (SiN, SiC, SiGe ecc.), sia drogate che non, e di altri materiali, sempre in forma di film sottile, necessari alla realizzazione di celle e moduli, come ossidi trasparenti e conduttori (TCO) e metalli. Il record di efficienza del 10,9% è stato ottenuto su una struttura stacked a-Si/a-Si da 1 cm^2 depositata su vetro usando un reattore di deposizione a tre camere. Le indicazioni ottenute dallo studio delle celle a piccola area vengono sfruttate per la realizzazione di moduli e mini-moduli. Il modulo a maggiore efficienza 9,1% (7,5% stabilizzato) è stato certificato presso i laboratori del NREL.

Nella tecnologia delle celle solari a film sottile l'ossido trasparente e conduttivo (TCO) è usato come elettrodo frontale del dispositivo. L'ossido deve avere tre importanti qualità per assicurare il più efficace intrappolamento della luce all'interno del dispositivo: buona conducibilità elettrica, buona trasmissione ottica ed una appropriata rugosità superficiale in grado di scatterare la luce che entra nella cella. Queste proprietà del TCO influenzano in maniera cruciale le performance del dispositivo. Il recente sviluppo di celle solari a base di silicio microcristallino ha portato l'attenzione internazionale su TCO a base di ZnO, per la sua alta stabilità in plasma di idrogeno e la relativamente bassa temperatura di deposizione. Non essendo disponibili sul mercato substrati di vetro ricoperti di ZnO nei laboratori del Centro Ricerche ENEA di Portici è stato progettato e realizzato un impianto Low Pressure-Metalorganic Chemical Vapour Deposition (LP-MOCVD) per la deposizione di film sottili di ZnO drogato su area 30×30 cm^2 . La messa a punto dei parametri di deposizione ha consentito l'ottimizzazione delle proprietà del materiale su larga area sia in termini di uniformità che di rugosità del materiale. Le eccellenti proprietà di scattering della luce mostrate lo rendono idoneo all'uso come elettrodo frontale trasparente e conduttivo di dispositivi ad alta efficienza.

Inoltre sono state realizzate celle solari con eterogiunzioni silicio amorfo-silicio cristallino che hanno mostrato un'efficienza dell'ordine del 16% su piccola area e del 13% su 50 cm^2 .

Concentrazione: Progetto PHOCUS

Il Progetto PhoCUS (Photovoltaic Concentrators to Utility Scale) dell'ENEA ha lo scopo di dimostrare la fattibilità tecnica del fotovoltaico a concentrazione e le sue potenzialità, rispetto al fotovoltaico convenzionale, per il raggiungimento della competitività economica.

² Più correttamente si intende in questo testo parlare di silicio amorfo idrogenato (a-Si:H) come si ottiene da tecniche di deposizione per PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), e non di silicio amorfo privo di idrogeno come si ottiene tipicamente, ad esempio, per sputtering.

Nell'ambito del progetto PhoCUS sono state previste attività sia di Ricerca & Sviluppo sia di dimostrazione e sperimentazione sul campo. Le prime (da svolgere presso i laboratori dei Centri ENEA di Portici e Casaccia) sono relative ai principali componenti dell'impianto, quali la cella, il dispositivo ottico, il modulo, la struttura ad inseguimento ed il sistema di condizionamento della potenza; le seconde prevedono l'installazione di facilities sperimentali presso il Centro ENEA di Portici e la realizzazione di più unità (3 sistemi) nell'Area Sperimentale ENEA di Monte Aquilone in Manfredonia .

Gli obiettivi principali del progetto sono:

- 1) Sviluppo di una unità standard da 5 kW e realizzazione, installazione, messa in servizio e sperimentazione di più unità presso Manfredonia;
- 2) Sviluppo e messa a punto del processo per la realizzazione di celle in c-Si ad alta efficienza con la installazione e messa in funzione della nuova linea presso il Centro di Portici;
- 3) Sviluppo e messa a punto della tecnologia per la realizzazione di un modulo integrato a media concentrazione;
- 4) Sviluppo e sperimentazione di sistemi cella solare/dispositivo ottico basati su tecnologie alternative;
- 5) Sperimentazione e valutazione tecnico-economica dell'applicazione del fotovoltaico a media concentrazione in Italia.

Per quanto riguarda il ricevitore, è stata progettata e realizzata interamente in ENEA una cella al silicio cristallino ad alta efficienza, che mostra efficienze superiori al 21% a concentrazione di 100 soli (foto 1).

Relativamente al concentratore è stato brevettato da ENEA e sviluppato in collaborazione con la Borromini un concentratore prismatico che mostra ottime caratteristiche ottiche con una tecnologia di basso costo (foto 2).

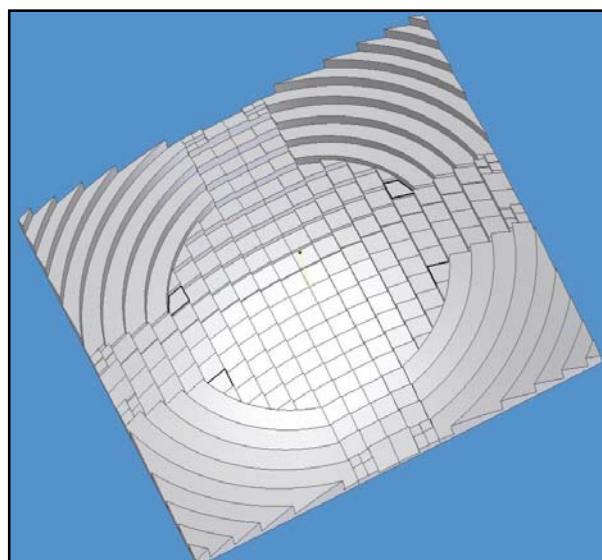


Foto 1 - Cella ENEA/PhoCUS

Foto 2 - Lente prismatica PhoCUS

Il modulo fotovoltaico è stato brevettato e sviluppato in collaborazione con Enitenologie e consente di raggiungere valori di efficienza dell'ordine del 16% (foto 3).

L'ottimizzazione di un sistema fotovoltaico a concentrazione richiede, inoltre, lo sviluppo di componenti specifici del BOS (Balance Of System), quali l'inseguitore solare e una specifica ingegneria di sistema per quanto riguarda il lay-out geometrico ed elettrico. Il fotovoltaico a concentrazione di tipo integrato richiede, infatti, l'uso di strutture in grado di inseguire il sole sui due assi (alt-azimutale). Lo sviluppo di tale componente è stato effettuato da ENEA in collaborazione con Galileo Avionica. Inoltre ENEA ha brevettato il sistema di controllo e

movimentazione a basso costo e il sistema di controllo del puntamento che da un'accuratezza nel puntamento di $\pm 0,2^\circ$.



Foto 3 - Modulo PhoCUS

Per quanto riguarda l'architettura elettrica di impianto, essa è stata individuata in quella distribuita basata sull'uso di inverter di tipo multistringa da connettere su una rete in Bassa Tensione. Tutte le attività di tipo impiantistico si stanno avvalendo della pluriennale e consolidata esperienza ENEA sugli impianti fotovoltaici, presente nel centro di Portici e nell'Area sperimentale di Monte Aquilone in Manfredonia.

La prima unità prototipale mostra un'efficienza operativa di sistema dell'ordine del 14%.

Sistemi, componenti e applicazioni

Le attività riguardano l'individuazione, realizzazione e sperimentazione di nuove applicazioni per impianti connessi a rete e stand alone, lo studio, la progettazione e la sperimentazione di componenti e la caratterizzazione ed il testing dei moduli. A tal fine ENEA ha realizzato l'area sperimentale di Monte Aquilone (Foggia) dove è stato realizzato nel '90 il primo grande impianto PV italiano da 600 kW, Delphos, connesso a rete e destinato allo studio e all'analisi delle problematiche di interconnessione su rete nazionale. Negli ultimi anni l'impegno ENEA ha riguardato, in modo più mirato, lo sviluppo di quelle applicazioni ove le caratteristiche di modularità del fotovoltaico vengono ulteriormente valorizzate da fattori esterni al fotovoltaico stesso. È questo il caso dell'integrazione del fotovoltaico nell'edilizia, ritenuto un connubio molto interessante da diversi paesi per la possibilità di realizzare facciate, tetti e pensiline "fotovoltaiche". A tal fine l'ENEA ha avviato, fin dal 1996, un programma di sviluppo e dimostrazione di componenti e sistemi per l'edilizia. Per quanto riguarda la caratterizzazione vengono effettuate tutte le misure classiche (I-V, dark I-V, risposta in frequenza, mappatura termica, isolamento elettrico) indoor e outdoor e test di vita accelerati al fine di valutare le prestazioni dei moduli commerciali e di laboratorio.

Inoltre l'ENEA ha contribuito alla gestione tecnica del Programma "Tetti fotovoltaici" svolgendo un piano di attività di accompagnamento e supporto al Programma stesso. A tal fine, l'ENEA ha studiato e definito, sulla base delle proprie e altrui esperienze, i requisiti tecnici e le prescrizioni relative agli impianti per la generazione distribuita e ha provveduto

alla raccolta, analisi e pubblicazione dei dati di funzionamento di un campione di impianti realizzati nell'ambito del Programma e allo sviluppo di sistemi dedicati per l'acquisizione e la trasmissione dei dati di esercizio. Questa attività viene ancora svolta per il monitoraggio degli impianti realizzati dalla Regione Lazio.

Per quanto riguarda le applicazioni, recentemente è stato messo a punto il lampione fotovoltaico "Stapelia" (foto 4) ispirato alla forma stellata e pentagonale dell'omonimo fiore; studiato per andare incontro all'esigenza di impiego del fotovoltaico anche quando il pregio dei siti renderebbe arduo il suo inserimento.

Cinque moduli triangolari semitrasparenti per una potenza nominale di 128 Wp formano la corolla, innestata su uno stelo alto sei metri. L'illuminazione è affidata ad alcuni led inseriti in corrispondenza del pistillo centrale, che diffondono la luce su superfici opaline a formare un calice luminoso.



Foto 4 - Lampione Stapelia

Inoltre, l'ENEA rappresenta l'Italia nell'Executive Committee dell'Implementing Agreement sul fotovoltaico (PVPS) e in quattro Task su sei attualmente attivi. La partecipazione all'Agreement assicura all'ENEA la costante informazione sugli sviluppi del fotovoltaico e sulle diverse iniziative nei settori della ricerca, sviluppo, dimostrazione e diffusione nei 20 paesi partecipanti, peraltro i più attivi nel settore. L'ENEA garantisce infine la partecipazione italiana al CENELEC, organismo internazionale per la preparazione di standard e normativa tecnica.

Tecnologie emergenti

Per quanto riguarda invece le tecnologie emergenti nell'ambito del Progetto TEFIS (Tecnologie Fotovoltaiche a Film Sottile) è stata sviluppata dall'ENEA la tecnologia di fabbricazione delle celle fotovoltaiche a base di silicio microcristallino su substrati di vetro, destinati all'integrazione negli edifici. Tale tecnologia è prossima alla commercializzazione in Giappone. Il silicio microcristallino è un materiale che, rispetto al silicio amorfo, ha caratteristiche strutturali tali da consentire la realizzazione di dispositivi fotovoltaici con un'efficienza stabile più elevata, conservando i vantaggi economici e tecnologici del silicio amorfo: produzioni di massa a basso costo, disponibilità delle materie prime, buona compatibilità ambientale.

Le celle realizzate sono del tipo "micromorph", ossia dispositivi tandem con una cella bottom di silicio microcristallino e con una top cell di silicio amorfo, ottenendo buoni risultati con la tecnica Very High Frequency PECVD, che permette elevate velocità di deposizione con conseguente riduzione dei tempi di lavorazione e quindi dei costi associati.

Sono state ottenute celle con un'efficienza dell'11,3 % utilizzando uno spessore degli strati attivi intrinseci della cella bottom e della top, rispettivamente, di circa 1,5 nm e di circa 300 nm, con una temperatura di processo di soli 150 °C, il che consente di contenere i consumi

energetici di fabbricazione e, soprattutto, di considerare la possibilità di trasferire la tecnologia sviluppata su substrati di tipo polimerico. I dispositivi sviluppati hanno dimostrato una buona stabilità all'esposizione alla luce, con un degrado dell'efficienza valutato inferiore al 10%.

I risultati ottenuti sono in linea con quelli ottenuti dai laboratori europei e internazionali impegnati nello stesso campo (su area di 0,25 cm² è stata attribuita ai laboratori dell'Università di Neuchatel un'efficienza stabilizzata del 10,9%).

Infine, sono state recentemente avviate attività relative all'ossido rameoso (Cu₂O) in quanto materiale di basso costo e buona efficienza. Il processo di preparazione dei substrati di Cu₂O è sufficientemente ben sviluppato da permettere di indagare le problematiche connesse ai dispositivi. Le celle solari di tipo Schottky sono arrivate ad un buon livello di efficienza e potranno essere usate come strumenti per studi di base sul materiale e sui dispositivi. Tuttavia non sembra particolarmente utile insistere sul miglioramento della loro efficienza che presenta dei limiti intrinseci apparentemente invalicabili. Le celle solari realizzate con eterogiunzioni sono il vero banco di prova del Cu₂O. Gli esperimenti finora condotti mostrano efficienze fino al 2% (record assoluto) realizzato depositando ZnO a temperatura ambiente su Cu₂O.

3.2 Il posizionamento

La disponibilità di energia inesauribile, pulita, sicura e affidabile è uno dei prerequisiti per lo sviluppo di una società sostenibile. Per assicurare la sicurezza e la sostenibilità delle forniture energetiche è necessario diversificare gli approvvigionamenti ricorrendo a risorse di energia rinnovabile. L'Europa, insieme con i grandi paesi industrializzati, ha indicato il fotovoltaico quale tecnologia di punta per il futuro. L'impiego su vasta scala del fotovoltaico è però un processo di lungo termine. Sebbene la tecnologia sia già oggi disponibile richiede ancora ulteriori sviluppi soprattutto per quanto riguarda i costi dell'energia prodotta. I benefici economici del settore commerciale della tecnologia fotovoltaica sono già stati dimostrati e hanno dato l'avvio ad una significativa competizione globale. Il prossimo decennio è considerato decisivo per la soluzione delle problematiche inerenti il fotovoltaico: partecipare alla competizione è qualificante per il livello tecnologico di un Paese. La partecipazione è subordinata alla presenza di industrie a livello nazionale che operino su tecnologie commerciali integrate da attività di ricerca avanzate. Tutto ciò richiede un ambizioso e coerente programma di ricerca e sviluppo, incentivi al mercato, informazione e formazione, normative e regole chiare.

Tutte queste attività fanno parte del bagaglio culturale che l'ENEA ha accumulato negli ultimi venti anni:

- Capacità di ricerca innovativa nei diversi settori anche complementari alla tecnologia fotovoltaica. Le attività già avviate e inserite in realtà europee di ricerca sono uno dei punti di forza dell'ENEA che necessitano di un'azione di rinnovamento e slancio perché troppo a lungo trascurate nei piani strategici nazionali. In questa direzione l'Agenda Strategica Europea, messa a punto anche con il contributo italiano, potrà dare un significativo apporto all'individuazione di progetti che ci consentano di recuperare la leadership del settore. La capacità ENEA di integrare competenze diverse in un unico sforzo rappresenta l'elemento chiave di una nuova proposta.
- Capacità di trasferimento delle competenze sviluppate. È qui che l'ENEA può dare il contributo più rilevante: aprire i propri laboratori attrezzati a nuove imprese di settore per sviluppare insieme nuovi prodotti e processi, formando contemporaneamente tecnici qualificati in grado di sostenere una sfida imprenditoriale. Proprio nel settore industriale è stata aperta oggi in Italia la grande sfida alla competitività che dovrà essere giocata sul campo dell'innovazione e della tecnologia. Nuove imprese fotovoltaiche possono trovare in ENEA competenze uniche e altamente specialistiche sulle tecnologie del silicio cristallino, le uniche in grado di ridurre il rischio industriale. La promozione di imprese tecnologicamente avanzate vede in primo piano non solo i Ministeri preposti, come da tradizione, ma anche le Regioni che sembrano pronte a subentrare nelle competenze che derivano loro dalla

modifica del titolo quinto della Costituzione. È probabilmente a livello locale una nuova via da percorrere; l'ENEA, grazie alla sua presenza territoriale, ha da sempre interagito con le realtà locali e ancora di più potrebbe farlo con tecnologie che sul territorio si sviluppano nell'ottica della valorizzazione della generazione distribuita e del consumo locale. È questo il paradigma su cui si basano le rinnovabili in genere, e il PV in particolare, che unisce concetti di localizzazione a esigenze territoriali: energia prodotta laddove viene utilizzata rispettando criteri di sostenibilità locale e valorizzazione del potenziale endogeno.

- Capacità di formazione/informazione. È ormai competenza consolidata che l'ENEA svolge a diversi livelli, sia all'interno dei laboratori, con la formazione scientifica di laureandi, dottorandi e borsisti, sia all'esterno con lezioni universitarie e specialistiche (master universitari) che con corsi di formazione per installatori, progettisti e collaudatori.
- Capacità di 'lobbying'. La ventennale esperienza accumulata nel suo ruolo di unico riferimento italiano nel fotovoltaico sia con la gestione e il coordinamento dei grandi programmi nazionali, sia con il lavoro scientifico svolto sempre all'interno di gruppi europei e non, conferisce all'ENEA l'autorevolezza necessaria a creare rapidamente una massa critica con tutti gli attori italiani del settore, con cui da sempre intrattiene rapporti di collaborazione scientifica. Ciò è urgente e importante, per evitare che vengano disperse risorse economiche e umane in rivoli e iniziative frammentate o con scarse probabilità di successo.

