

IL FOTOVOLTAICO

**A cura di
S. Castello e F. De Lia**

Indice

LA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICO	3
La cella fotovoltaica	3
Il silicio cristallino	4
Le nuove tecnologie	4
GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI	6
Le caratteristiche	6
La classificazione e i componenti	6
Gli impianti isolati	7
Gli impianti collegati alla rete	9
La generazione diffusa	10
Gli impianti dimostrativi	10
I sistemi a concentrazione	11
LE PECULIARITÀ DEL FOTOVOLTAICO	12
L'impatto ambientale	12
Il risparmio di combustibile	12
Tempo di ritorno dell'investimento energetico	12
Il degrado dei moduli	13
L'impatto sul territorio	13
Il fotovoltaico e l'architettura	14
L'ECONOMIA DEL FOTOVOLTAICO	15
La diffusione della tecnologia	15
Il mercato	16
Le prospettive	18
I costi di impianto	18
Il costo del kWh	19
Il valore aggiunto del fotovoltaico	20
I programmi di diffusione	21

LA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICO

La cella fotovoltaica

Consiste nella conversione diretta della radiazione solare in energia elettrica. Tale fenomeno avviene nella cella fotovoltaica, tipicamente costituita da una sottile lamina di un materiale semiconduttore, molto spesso silicio.

Quando un fotone dotato di sufficiente energia viene assorbito nella cella, nel materiale semiconduttore di cui essa è costituita si crea una coppia di cariche elettriche di segno opposto, un

“elettrone” (cioè una carica di segno negativo) ed una “lacuna” (carica positiva).

Tali cariche danno luogo a una circolazione di corrente quando il dispositivo viene connesso ad un carico. La corrente è tanto maggiore quanto maggiore è la quantità di luce incidente.

La cella può utilizzare solo una parte dell’energia della radiazione solare incidente.

L’energia sfruttabile dipende dalle caratteristiche del materiale di cui è costituita la cella:

l’efficienza di conversione, intesa come percentuale di energia luminosa tra-

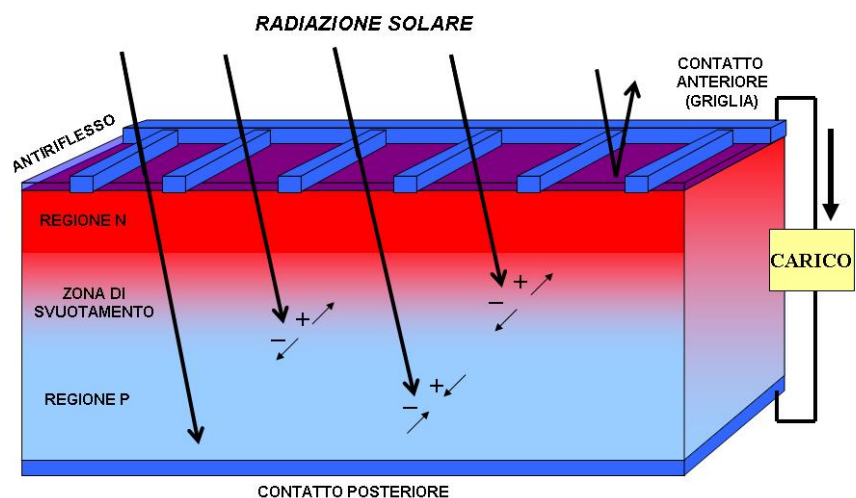
sformata in energia elettrica disponibile per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 12% e il 17%, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 24%.

L’efficienza di conversione di una cella solare è limitata da numerosi fattori, alcuni dei quali di tipo fisico, cioè dovuti al fenomeno fotoelettrico e pertanto assolutamente inevitabili, mentre altri, di tipo tecnologico, derivano dal particolare processo adottato per la fabbricazione del dispositivo

fotovoltaico.

Per fabbricare la cella si utilizzano un wafer di silicio di tipo sia monocristallino che policristallino. La fetta viene prima trattata con decappaggio chimico al fine di eliminare eventuali asperità superficiali e poi sottoposta al processo di formazione della giunzione p-n: il drogaggio avviene per diffusione controllata delle impurità in forni (se ad es. si parte da silicio di tipo p, si fanno diffondere atomi di

STRUTTURA DELLA CELLA



CELLE FOTOVOLTAICHE



fosforo, che droga n, con una profondità di giunzione pari a 0,3-0,4 μm).

Segue quindi la realizzazione della griglia metallica frontale di raccolta delle cariche elettriche e del contatto elettrico posteriore, per elettrodeposizione o per serigrafia.

Al fine di minimizzare le perdite per riflessione ottica, si opera la deposizione di un sottile strato antiriflesso, per es., di TiO_2 .

Il silicio cristallino

Le celle costituiscono un prodotto intermedio dell'industria fotovoltaica: forniscono valori di tensione e corrente limitati in rapporto a quelli normalmente richiesti dagli apparecchi utilizzatori, sono estremamente fragili, elettricamente non isolate, prive di supporto meccanico.

Esse vengono, quindi, assemblate in modo opportuno a costituire un'unica struttura: il modulo fotovoltaico; una struttura robusta e maneggevole, in grado di garantire molti anni di funzionamento anche in condizioni ambientali difficili.

Il processo di fabbricazione dei moduli è articolato in varie fasi: connessione elettrica, incapsulamento, montaggio della cornice e della scatola di giunzione.

La connessione elettrica consiste nel collegare in serie-parallelo le singole celle per ottenere i valori di tensione e di corrente desiderati.

Al fine di ridurre le perdite per disaccoppiamento elettrico è necessario che le celle di uno stesso modulo abbiano caratteristiche elettriche simili tra loro.

L'incapsulamento consiste nell'inglobare le celle fotovoltaiche tra una lastra di vetro e una di plastica, tramite laminazione a caldo di materiale polimerico. È importante che l'incapsulamento, oltre a proteggere le celle, sia trasparente alla radiazione solare, stabile ai raggi ultravioletti e alla temperatura, abbia capacità autopulenti e consenta di mantenere bassa la temperatura delle celle.

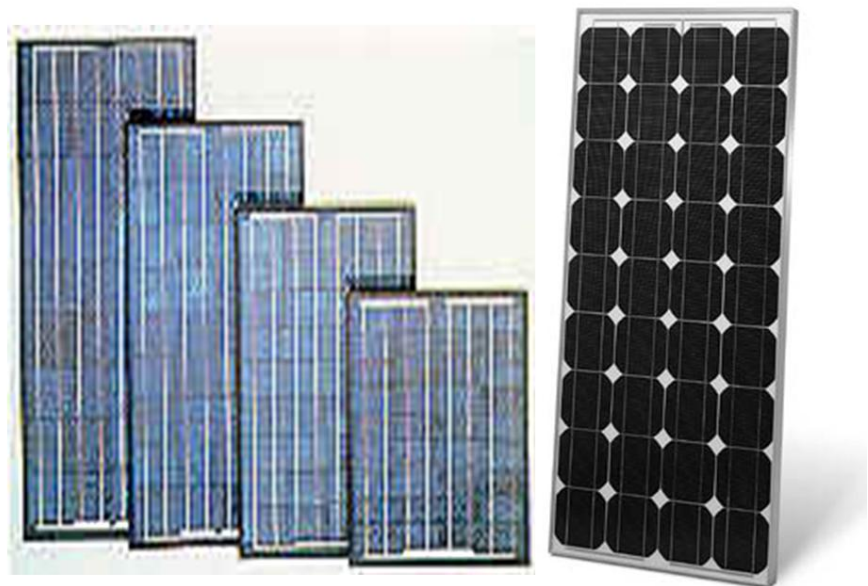
In linea di principio la vita di una cella solare è infinita; è pertanto la durata dell'incapsulamento a determinare la durata di vita del modulo, oggi stimabile in 25-30 anni.

Il montaggio della cornice conferisce al modulo maggiore robustezza e ne consente l'ancoraggio alle strutture di sostegno.

Le nuove tecnologie

Gli sforzi della ricerca e delle industrie fotovoltaiche sono mirati alla riduzione dei costi di produzione ed al miglioramento dell'efficienza di conversione attraverso la realizzazione di celle innovative e lo studio e la sperimentazione di nuovi materiali.

I MODULI FOTOVOLTAICI



Si punta a sviluppare varie tecnologie, basate su diversi materiali, semplici e composti. Le più rilevanti sono il silicio di grado solare e i “film sottili”. In particolare, nel silicio di grado solare è prevista la purificazione del silicio metallurgico, anziché attraverso i costosi processi Siemens e Czochralskj, mediante processi a basso contenuto energetico e a basso costo. La disponibilità di questo materiale, a differenza del silicio di grado elettronico, è praticamente illimitata. Con il silicio di grado solare, essendo caratterizzato da un minor grado di purezza rispetto a quello elettronico, è possibile inoltre realizzare celle con efficienza dell’11-13%.

Per quanto riguarda invece la tecnologia dei film sottili, essa sfrutta la deposizione (ad esempio su vetro) di un sottilissimo strato di materiali semiconduttori, in pratica il silicio amorfo ed alcuni semiconduttori composti policristallini, quali il diseleniuro di indio e rame (CuInSe_2) e il telluriuro di cadmio (CdTe).

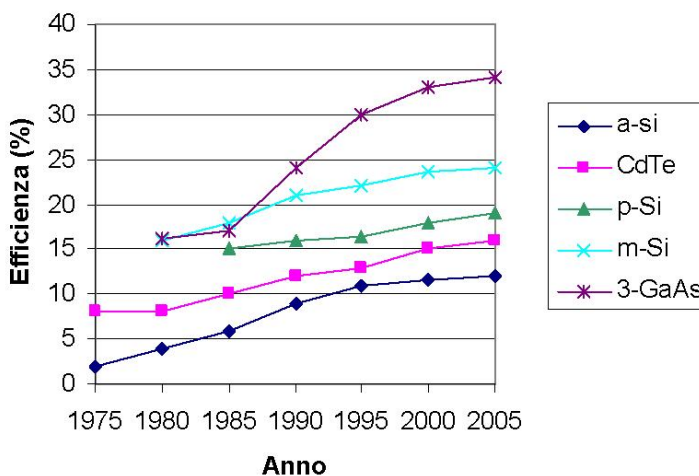
Tale tecnologia punta sulla riduzione del costo della cella e sulla versatilità d’impiego (ad esempio la deposizione su materiali da utilizzare quali elementi strutturali delle facciate degli edifici), anche se resta da superare l’ostacolo rappresentato dalla bassa efficienza e dall’instabilità iniziale. Questa tecnologia potrebbe rappresentare la carta vincente per trasformare il fotovoltaico in una fonte energetica in grado di produrre energia su grande scala.

La tecnologia a film sottile può risolvere il problema dell’approvvigionamento del materiale, in quanto, comportando un consumo di materiale molto limitato, pari a circa 1/200 di quello richiesto per la tecnologia del silicio cristallino (in questo caso la ‘fetta’ ha uno spessore ridottissimo dell’ordine di pochi micron), potrebbe permettere lo sviluppo di processi produttivi dedicati, che non dipendano dall’industria elettronica.

Inoltre, utilizzando questa tecnologia è possibile ottenere moduli leggeri e flessibili, fabbricare il modulo con un unico processo e avere la possibilità di realizzare celle tandem.

Potenzialmente i film sottili hanno un costo inferiore al silicio cristallino, sia per la maggiore semplicità del processo realizzativi, sia per il minor *pay-back time*. Esso equivale al periodo di tempo che deve operare il dispositivo fotovoltaico per produrre l’energia che è stata necessaria per la sua realizzazione. Infatti, per le celle al silicio cristallino il *pay-back time* corrisponde a circa 3,2 anni mentre per quelle a film sottile è pari a circa 1,5 anni.

DISPOSITIVI REALIZZATI IN LABORATORIO



GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Le caratteristiche

La tecnologia FV è relativamente recente: il suo sviluppo inizia negli anni 50 con la prima cella al silicio cristallino realizzata presso i laboratori Bell Telephone. Nel 1958 si ebbe la prima applicazione nello spazio (Vanguard I) mentre le applicazioni terrestri iniziarono verso la metà degli anni 70 accompagnate da programmi di ricerca e sviluppo. Da allora il costo è costantemente diminuito ma resta ancora elevato rispetto alle altre tecnologie.

Malgrado l'elevato costo, il fotovoltaico rappresenta fra le varie fonti rinnovabili, proprio per le sue caratteristiche intrinseche, l'opzione più attraente e promettente nel medio e lungo termine.

I sistemi fotovoltaici, infatti, sono:

- modulari: si può facilmente dimensionare il sistema, in base alle particolari necessità, sfruttando il giusto numero di moduli;
- per il loro uso essi non richiedono combustibile, né riparazioni complicate: questa è la caratteristica che rende il fotovoltaico una fonte molto interessante, in particolare per i Paesi in via di sviluppo, in quanto l'altra possibilità è rappresentata da generatori che richiedono sia combustibile, la cui fornitura è spesso irregolare e a costi molto onerosi, che interventi di manutenzione più impegnativi;
- non richiedono manutenzione: è sostanzialmente riconducibile a quella degli impianti elettrici consistente nella verifica annuale dell'isolamento e della continuità elettrica. Inoltre i moduli sono praticamente inattaccabili dagli agenti atmosferici e si puliscono automaticamente con le piogge, come dimostrato da esperienze in campo e in laboratorio;
- funzionano in automatico: non richiedono alcun intervento per l'esercizio dell'impianto;
- hanno positive implicazioni sociali: per esempio, l'illuminazione di una scuola in una zona rurale permette un'educazione serale e attività comunitarie; l'alimentazione di frigoriferi aiuta l'efficacia dei programmi di immunizzazione alle malattie endemiche;
- sono molto affidabili: l'esperienza sul campo ha dimostrato una maggiore affidabilità rispetto ai generatori diesel e a quelli eolici;
- hanno una elevata durata di vita: le prestazioni degradano di poco o niente dopo 20 anni di attività. Norme tecniche e di garanzia della qualità stabilite, per i moduli, da alcuni paesi europei garantiscono tale durata di vita;
- consentono l'utilizzo di superfici marginali o altrimenti inutilizzabili;
- sono economicamente interessanti per le utenze isolate (a fronte del costo di linee di trasmissione dell'energia elettrica, valutate in decine di migliaia di euro al km).

La classificazione e i componenti

Gli impianti sono classificabili in:

- impianti isolati (stand-alone), nei quali l'energia prodotta alimenta direttamente un carico elettrico e, per la parte in eccedenza, viene generalmente accumulata in apposite batterie di accumulatori, che la renderanno disponibile all'utenza nelle ore in cui manca l'insolazione;
- impianti connessi ad una rete elettrica di distribuzione (grid-connected): l'energia viene convertita in corrente elettrica alternata per alimentare il carico-utente e/o immessa nella rete, con la quale lavora in regime di interscambio.

Un impianto fotovoltaico è costituito da un insieme di componenti meccanici, elettrici ed elettronici che captano l'energia solare, la trasformano in energia elettrica, sino a renderla disponibile all'utilizzazione da parte dell'utenza. Esso sarà quindi costituito dal generatore fotovoltaico, da un

sistema di controllo e condizionamento della potenza e, per gli impianti isolati, da un sistema di accumulo.

Il rendimento di conversione complessivo di un impianto è il risultato di una serie di rendimenti, che a partire da quello della cella, passando per quello del modulo, del sistema di controllo della potenza e di quello di conversione, ed eventualmente di quello di accumulo, permette di ricavare la percentuale di energia incidente che è possibile trovare all'uscita dell'impianto, sotto forma di energia elettrica, resa al carico utilizzatore.

- Il generatore fotovoltaico

Collegando in serie-parallelo un insieme opportuno di moduli si ottiene un generatore o un campo fotovoltaico, con le caratteristiche desiderate di corrente e tensione di lavoro. I suoi parametri elettrici principali sono la potenza nominale, che è la potenza erogata dal generatore in condizioni nominali standard (irraggiamento di 1000 W/m^2 e temperatura dei moduli di $25 \text{ }^\circ\text{C}$) e la tensione nominale, tensione alla quale viene erogata la potenza nominale.

I moduli o i pannelli sono montati su una struttura meccanica capace di sostenerli e ancorarli. Generalmente tale struttura è orientata in modo da massimizzare l'irraggiamento solare.

- Il sistema di condizionamento della potenza

La caratteristica di variabilità di tensione e corrente in uscita dal generatore fotovoltaico al variare dell'irraggiamento solare mal si adatta alle specifiche dell'utenza, che spesso richiede corrente in alternata, per alimentare direttamente il carico o per il collegamento alla rete elettrica di distribuzione, nonché un valore costante per la tensione in uscita dal generatore.

Nei sistemi fotovoltaici il generatore è quindi collegato, a seconda dei casi, alla batteria, agli apparecchi utilizzatori o alla rete, tramite un sistema di controllo e condizionamento della potenza.

Nei sistemi isolati il sistema di condizionamento della potenza adatta le caratteristiche del generatore fotovoltaico a quelle dell'utenza e gestisce il sistema di accumulo attraverso il regolatore di carica. In particolare il regolatore di carica serve sostanzialmente a preservare gli accumulatori da un eccesso di carica ad opera del generatore fotovoltaico e da un eccesso di scarica dovuto all'utilizzazione, entrambe condizioni nocive alla salute e alla durata degli accumulatori.

Nei sistemi connessi alla rete il sistema di controllo della potenza converte la corrente prodotta dal generatore fotovoltaico da continua in alternata, adatta la tensione del generatore a quella di rete effettuando l'inseguimento del punto di massima potenza e, infine, controlla la qualità della potenza immessa in rete in termini di distorsione e rifasamento.

Gli impianti isolati

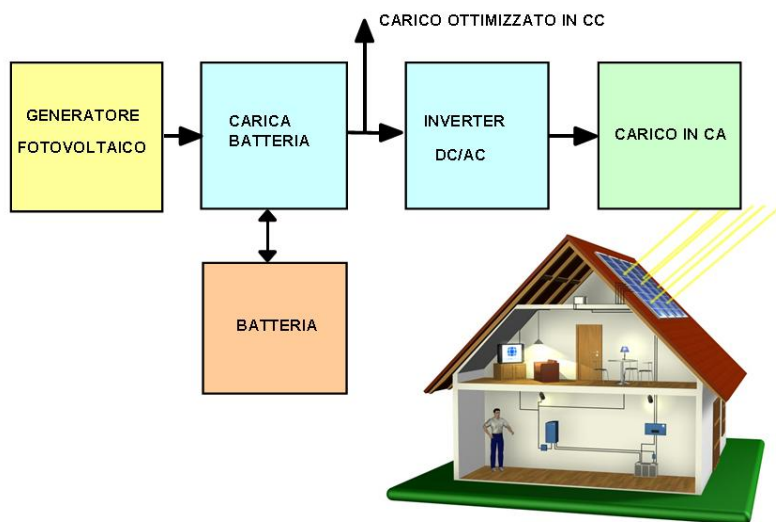
La disponibilità di energia elettrica, fornita da un generatore fotovoltaico, risulta spesso economicamente conveniente rispetto alle altre fonti concorrenti. Ciò in ragione degli elevati costi legati alla realizzazione di linee di distribuzione in zone a bassa densità abitativa e bassi consumi, oltre che del negativo impatto sul paesaggio. Anche nei casi in cui non esistono impedimenti di ordine economico all'approvvigionamento di elettricità tramite gruppi elettro-

IMPIANTI ISOLATI - LE APPLICAZIONI



geni, bisogna considerarne, a fronte dei costi d'investimento indubbiamente più bassi, gli inconvenienti legati all'approvvigionamento del combustibile, alla rumorosità, all'inquinamento indotto e ai non trascurabili costi di manutenzione.

IMPIANTO ISOLATO PER UTENZA DOMESTICA
SCHEMA ABLOCCHI



Piccoli generatori fotovoltaici sono utili ad alimentare utenze elettriche situate in località non ancora raggiunte dalla rete elettrica, o in luoghi in cui il collegamento alla rete comporta costi di investimento troppo elevati rispetto alle piccole quantità di energia richieste.

Una simile applicazione può essere, inoltre, molto utile per portare l'energia elettrica a rifugi, case isolate e siti archeologici, evitando onerose e problematiche operazioni di scavo per i collegamenti elettrici e

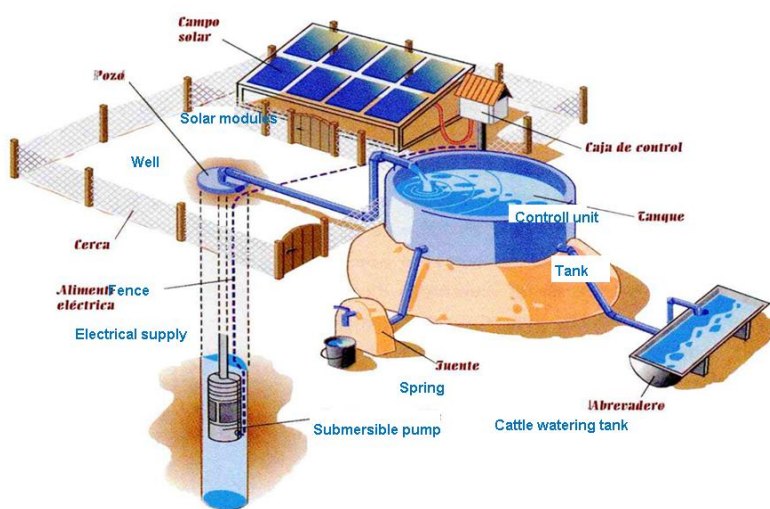
costose gestioni di linee di trasmissione e sottostazioni elettriche.

Inoltre, le caratteristiche dei sistemi fotovoltaici permettono risposte adeguate ai problemi di mancanza di energia elettrica nei Paesi in via di sviluppo: oltre due miliardi di persone, abitanti nelle regioni più povere del pianeta, sono prive di collegamento alla rete elettrica di distribuzione. Rispetto alle fonti tradizionali il fotovoltaico è facilmente gestibile in modo autonomo dalle popolazioni locali e può essere applicato in modo capillare, senza dover costruire grandi reti di distribuzione, risultando quindi economico e compatibile con eco-ambienti ancora non contaminati da attività industriali.

Esempi o campi di applicazioni per utenze isolate sono:

- il pompaggio dell'acqua, soprattutto in agricoltura;
- l'alimentazione di ripetitori radio, di stazioni di rilevamento e trasmissione dati (meteorologici, sismici, sui livelli dei corsi d'acqua), di apparecchi telefonici nel settore delle comunicazioni;
- la carica di batterie, nella marina da diporto, nel tempo libero, per installazioni militari ecc.;
- la segnalazione o prevenzione incendi, nei servizi di protezione civile;
- nei servizi sanitari, ad es. per l'alimentazione di frigoriferi, molto utili soprattutto nei Paesi in via di sviluppo per la conservazione di vaccini e sangue;

IMPIANTO PER IL POMPAGGIO ACQUA



- l'illuminazione e, in generale, la fornitura di potenza per case, scuole, ospedali, rifugi, fattorie, laboratori ecc.;
- la potabilizzazione dell'acqua;
- la segnaletica sulle strade, le segnalazione di pericolo nei porti e negli aeroporti;
- la protezione catodica nell'industria e nel settore petrolifero e delle strutture metalliche in generale.

Tali impianti richiedono sistemi di accumulo che garantiscano la fornitura di energia anche di notte o in condizioni meteorologiche sfavorevoli e, se gli utilizzatori sono in corrente alternata, viene anche adottato un inverter, che trasforma la corrente continua in uscita dal generatore fotovoltaico in alternata, assicurando il valore desiderato di tensione. Nel caso di generatori fotovoltaici al servizio di impianti di pompaggio, il sistema di accumulo è generalmente costituito dal serbatoio idrico.

Gli impianti collegati alla rete

Tali impianti sono utilizzati dove la produzione di energia elettrica da fonte convenzionale è costosa e/o a elevato impatto ambientale: tipiche applicazioni riguardano la generazione diffusa mediante piccoli impianti collegati alla rete elettrica di distribuzione in bassa tensione, che, a differenza delle

utenze isolate, non vedono l'utilizzo di batterie.

APPLICAZIONI DI IMPIANTI COLLEGATI ALLA RETE



Una tipica applicazione in questo settore è quella relativa ai sistemi fotovoltaici integrati negli edifici.

Questo tipo di utilizzazione, in rapido sviluppo, richiede l'impegno non solo dell'industria fotovoltaica e delle capacità progettuali di architetti ed ingegneri che ne rendano possibile l'integrazione tecnica, estetica ed economica nelle strutture edilizie, ma soprattutto degli or-

gani politici preposti all'emanazione di leggi che ne incentivino lo sviluppo e la diffusione.

Altre applicazioni riguardano il supporto a rami deboli della rete di distribuzione o alle reti di piccole isole. In quest'ultimo caso il costo del kWh fotovoltaico è prossimo a quello prodotto mediante un sistema diesel.

Non meno importanti nel lungo periodo sono, infine, le applicazioni costituite da vere e proprie centrali di generazione di energia elettrica, collegate alla rete, realizzate sino ad oggi, principalmente, con propositi di ricerca e dimostrazione, al fine di studiare in condizioni reali le prestazioni del sistema e dei vari componenti.

A titolo di esempio, la centrale fotovoltaica realizzata dall'ENEL a Serre, in provincia di Salerno, è una fra le più grandi del mondo, occupa una superficie totale di 7 ettari, ha una potenza nominale di 3,3 MW e una produzione annua di progetto di 4,5 milioni di kWh.

La generazione diffusa

Viene realizzata mediante tanti piccoli impianti (1-50 kW) collegati alla rete in BT senza batterie. Tali impianti sono adatti per essere installati su edifici e infrastrutture (modularità, assenza rumori, parti in movimento e emissioni)

La potenzialità di questa applicazione è enorme nel senso che se si ricoprissero i tetti disponibili si produrrebbe energia sufficiente a tutti fabbisogni elettrici. Per questo tipo tipologia di impianti il costo dell'energia prodotta risulta però ancora doppio rispetto a quello della bolletta.

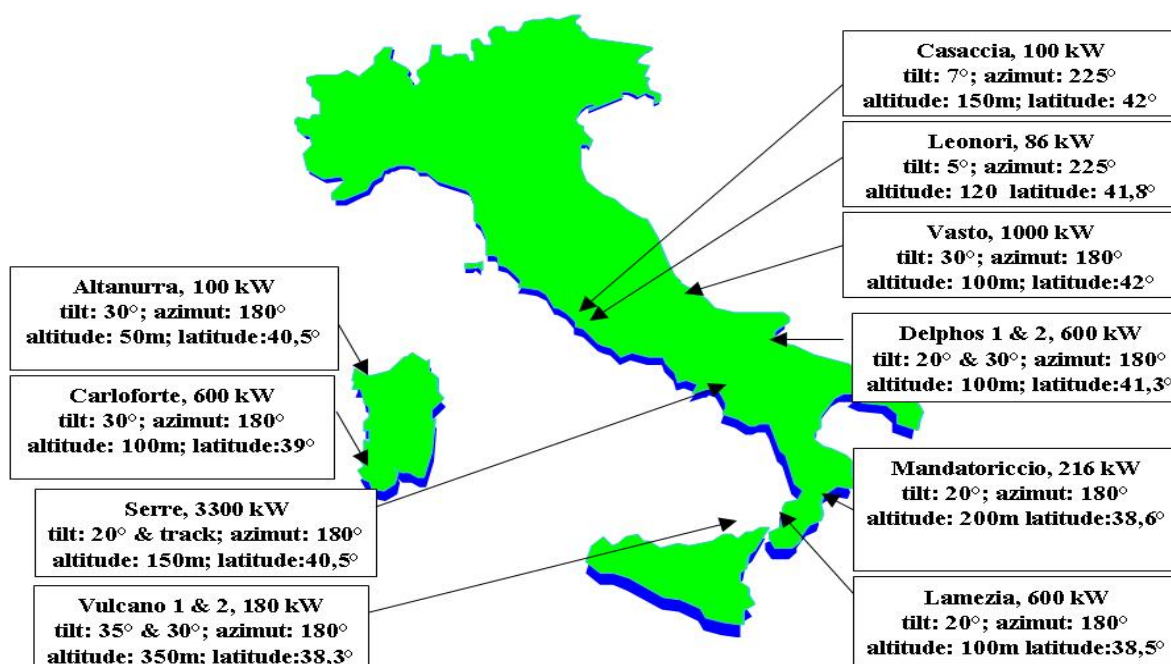
I principali vantaggi offerti da questa applicazione riguardano:

- l'impiego distribuito di una sorgente diffusa per sua natura;
- la generazione di energia elettrica nel luogo del consumo, evitando perdite di trasmissione;
- la semplicità di collegamento alla rete e la facilità di quest'ultima ad assorbire la potenza immessa;
- la possibilità di impiego di superfici inutilizzate;
- la valenza architettonica positiva del fotovoltaico nel contesto urbano.

Gli impianti dimostrativi

Sono stati realizzati negli anni 80 e 90 da alcuni operatori italiani (ENEA, ENEL, ANIT) al fine di verificare la fattibilità tecnica ed economica di alcune applicazioni. In particolare, con il progetto PLUG di ENEA si è voluto sviluppare un impianto standard 100 kW per applicazioni di media taglia al fine di minimizzazione dei costi attraverso la standardizzazione dei componenti, il ricorso ad una architettura di sistema modulare, l'uso di componenti preassemblati e l'assenza di lavori civili per l'installazione.

GLI IMPIANTI DIMOSTRATIVI



I sistemi a concentrazione

Tra le principali linee strategiche si ritrova il fotovoltaico a concentrazione per la sua maggiore potenzialità in alcuni segmenti del mercato della produzione di energia elettrica.

Il principio su cui si basa una cella fotovoltaica a concentrazione è molto semplice, consiste nel far convergere la radiazione solare tramite un sistema ottico sulla cella fotovoltaica. In questo modo è possibile ridurre l'area di estensione della cella e quindi ridurre la quantità di silicio a parità di output energetico.

A livello internazionale il fotovoltaico a concentrazione è considerato un'interessante opzione per ridurre in maniera significativa l'incidenza dei costi del componente fotovoltaico (il costo di investimento di un sistema fotovoltaico piano, che si aggira intorno ai 7 €/W, è per il 50% dovuto al componente fotovoltaico e per il 30-35% alle sole celle solari), che viene sostituito con materiali semi-convenzionali meno costosi. Negli impianti fotovoltaici a concentrazione la radiazione solare non va ad incidere direttamente sulle celle ma viene concentrata da opportune lenti; è come se le celle fossero investite non dalla radiazione proveniente da un unico sole ma da 100, 200 o più soli (in funzione del tipo di lente utilizzata) con una proporzionale riduzione dell'area effettiva delle celle solari da utilizzare. La diffusione di tale applicazione, parallelamente allo sviluppo di componenti non fotovoltaici a basso costo, fa intravedere la possibilità di raggiungere, nel medio-lungo termine, un costo di sistema inferiore a 2 €/W.

INSEGUIMENTO SU DUE ASSI



LE PECULIARITÀ DEL FOTOVOLTAICO

L'impatto ambientale

Gli impianti fotovoltaici non causano inquinamento ambientale:

- chimicamente non producono emissioni, residui o scorie;
- dal punto di vista termico le temperature massime in gioco raggiungono valori non superiori a 60 °C;
- non producono rumori.

La fonte fotovoltaica è l'unica che non richiede organi in movimento né circolazione di fluidi a temperature elevate o in pressione, e questo è un vantaggio tecnico determinante.

Il risparmio di combustibile

Si può ragionevolmente valutare in 30 anni la vita utile di un impianto (ma probabilmente "durerà" anche più); il che significa che esso, supponendo un *pay-back time* dell'impianto pari a 5 anni e una producibilità annua di 1.300 kWh/kW, nell'arco della sua vita efficace produrrà mediamente $1.300 \times (30 - 5) = 32.500$ kWh per ogni kW installato.

Dato che per ogni kWh elettrico al contatore dell'utente occorre bruciare circa 0,25 kg di combustibili fossili, ne risulta che ogni kW di fotovoltaico installato produrrà durante la sua vita quanto si consuma nelle centrali convenzionali "bruciando" $32.500 \times 0,25 = 8.000$ kg di combustibili fossili.

Tempo di ritorno dell'investimento energetico

Una volta analizzata dal punto di vista economico la non immediata competitività sul mercato del fotovoltaico rispetto alle tradizionali fonti non rinnovabili a meno di incentivi statali, è interessante indagare dal punto di vista del bilancio energetico su quanto si assottigli questa differenza. Si osserva, infatti, che:

1. I sistemi fotovoltaici generano più energia durante tutto il periodo di vita rispetto a quella necessaria alla produzione, installazione e rimozione.

Attualmente a parte i problemi legati all'esaurimento del combustibile fossile che hanno portato alla sperimentazione durante le crisi energetiche, le attuali ricerche sono mosse dalla nuova consapevolezza ambientale governativa sul fatto che:

2. Le emissioni di gas-serra sono nettamente inferiori rispetto a quelle dei combustibili fossili e sono osservabili solo attraverso un approccio relativo al ciclo di vita.

La valutazione energetica va attuata proprio in relazione alla prima osservazione e consiste nell'accumulare tutti gli input energetici durante ogni fase temporale di utilizzo di materiali che necessitano alla esistenza e alla eliminazione dell'impianto e poi relazionati con la generazione annuale di energia. Espressione più comune di questo bilancio è il "tempo di ritorno dell'investimento energetico" (TRIE).

La seconda osservazione richiede un'analisi più ampia in cui tutte le emissioni di CO₂ e di altri gas-serra sono valutate durante tutto il ciclo di vita dell'impianto fotovoltaico.

Il TRIE, è un indicatore che è usato di frequente per valutare i bilanci di energia di sistemi di produzione energetici. Spesso Il TRIE è semplicisticamente definita come l'energia di fabbricazione del sistema diviso la sua produzione energetica annua. Con maggiore esattezza la formulazione considera un calcolo di tutti gli input energetici considerandone il valore di energia primaria:

Tempo di ritorno dell'investimento energetico = Energia per la produzione, trasporto, installazione, esercizio e rimozione/Energia prodotta annuale.

Il degrado dei moduli

Sono in corso degli studi che si prefiggono di verificare il decadimento delle prestazioni di lotti di moduli fotovoltaici al silicio monocristallino, che si trovano da oltre 25 anni in esposizione continua alla radiazione solare. Il tempo trascorso consente di fare considerazioni sul tempo di vita dei moduli fotovoltaici. Questa stima, solitamente, viene effettuata in laboratorio mediante una serie di test che sottopongono i moduli a stress ambientali particolarmente gravosi, tipicamente cicli termici accelerati in ambienti ad elevato grado di umidità, estrapolando, poi, i risultati ottenuti al

fine di prevedere il comportamento dei moduli nelle reali condizioni operative.

La degradazione in termini di efficienza, se riferita alla misura fatta all'accettazione dei moduli, è stata dell'8,4% negli ultimi 22 anni. Il tasso di degradazione è quindi risultato all'incirca costante durante tutti i 22 anni e risulta circa pari allo 0,4% annuo.

Per ciò che concerne i difetti riscontrati sui moduli fotovoltaici, va precisato che alcuni di questi presentano

DEGRADO DEI MODULI



Evidente distacco del tedlar



Fessurazione del tedlar



Ingiallimento dei moduli



Ruggine sulla griglia di raccolta

fessurazioni sul tedlar posteriore, altri, appartenenti ad una serie diversa dello stesso modello di modulo, hanno il foglio di tedlar, a copertura del back d'alluminio, quasi completamente distaccato. Va, comunque, detto che i difetti sul tedlar non hanno prodotto conseguenze negative sulla prestazione dei moduli fotovoltaici, infatti non è stata notata alcuna significativa degradazione di efficienza, essendo questa in linea con quella media misurata.

Lo stesso discorso vale per quei moduli che appaiono ingialliti o che presentano sulle griglie delle cariche parzialmente arrugginite. Le scatole di giunzione sono apparse in ottime condizioni, solo su una era entrata acqua, probabilmente per un cattivo serraggio fatto in precedenza. Dal campione di 59 moduli testati solo uno è risultato interrotto (tale modulo nel 1991 aveva comunque fornito un valore di efficienza inferiore alla media); il tasso di "morte" dei moduli ricavato è pari a circa 1,7%.

L'impatto sul territorio

Per rendersi conto delle potenzialità energetiche e dell'impegno di territorio legati ad una centrale di potenza, si consideri che l'area occupata da un sistema fotovoltaico di potenza pari a 1000 kW (cioè un MW, che produce circa 1.300 MWh/anno e che rappresenta, all'incirca, la potenza sufficiente a soddisfare le esigenze elettriche di 650 famiglie) è di circa 1,5 ettari, dove

l'impegno di territorio è dovuto per il 50% alle aree occupate dai moduli e dalle parti del sistema, per l'altro 50% alle "aree di rispetto", di fatto libere, ma necessarie per evitare l'ombreggiamento. A fronte della richiesta di energia elettrica consumata in Italia (300 milioni di MWh) sarebbe necessario un impegno di territorio pari a 3.400 km². Tale impegno di territorio, sebbene enorme, costituisce solo un sesto dei terreni marginali in Italia (20.000 km²). Inoltre occorre ricordare che gli impianti non richiedono per la loro installazione opere fisse e che possono essere installati o integrati nelle strutture edilizie esistenti.

Il fotovoltaico e l'architettura

La più recente categoria di applicazioni della tecnologia fotovoltaica è quella dei sistemi integrati negli edifici. L'inserimento dei moduli fotovoltaici nei tetti e nelle facciate risponde alla natura distribuita della fonte solare.

La possibilità di integrare i moduli fotovoltaici nelle architetture e di trasformarli in componenti edili ha notevolmente ampliato gli orizzonti del fotovoltaico. Il variegato mondo della casistica dell'integrazione fotovoltaica può essere suddiviso in due categorie, quella dell'integrazione negli edifici e quella nelle infrastrutture urbane. Fra le tipologie integrate negli edifici si evidenziano le coperture (piane, inclinate, curve, a risege), le facciate (verticali, inclinate, a risege) i frangisole (fissi, mobili), i lucernai, gli elementi di rivestimento e le balaustre.

Le principali tipologie integrate nelle infrastrutture urbane riguardano le pensiline (per auto, o di attesa) le grandi coperture, le tettoie, i tabelloni informativi e le barriere antirumore.

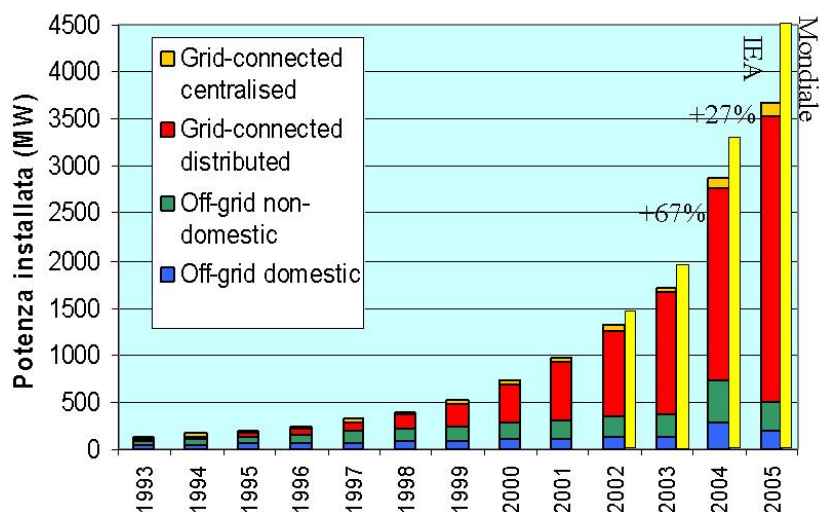
L'ECONOMIA DEL FOTOVOLTAICO

La diffusione della tecnologia

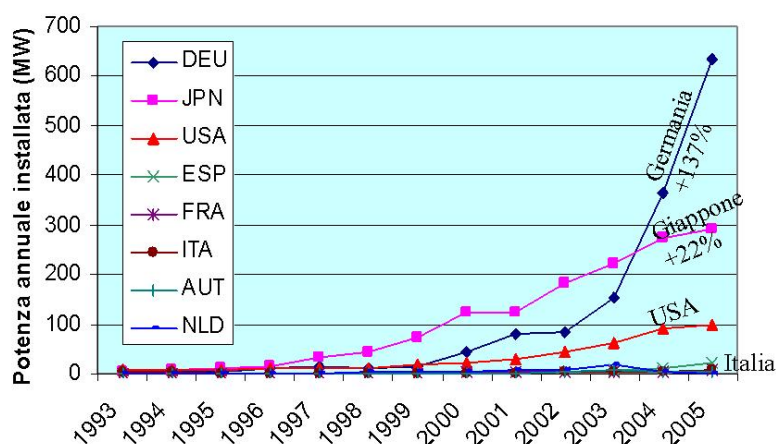
La capacità fotovoltaica installata a livello mondiale ha superato, nel 2005, i 4.500 MW, con un tasso di crescita del 27% in aumento rispetto agli anni precedenti. Relativamente alla distribuzione per aree geografiche, paese leader è il Giappone che, insieme alla Germania è quello che presenta il più elevato tasso di crescita annuale. Molto meno marcato, anche se positivo, appare il trend di crescita negli Stati Uniti, paese tra i primi a sviluppare questo settore di applicazioni.

Molto contenuto il trend di crescita in Italia che, a partire dal 2001, risulta inferiore alla pur bassa media europea. L'Italia, che fino a tutti gli anni 90 aveva mantenuto una posizione di leadership in Europa, non è stata in grado di allinearsi all'improvviso e sostenuto sviluppo che si è determinato, a partire dalla fine degli anni 90, non solo in Germania (non presente nel grafico) ma anche in Olanda, in Spagna e, con valori più bassi, anche in Francia e Austria.

POTENZA INSTALLATA



LA CRESCITA IN ALCUNI PAESI

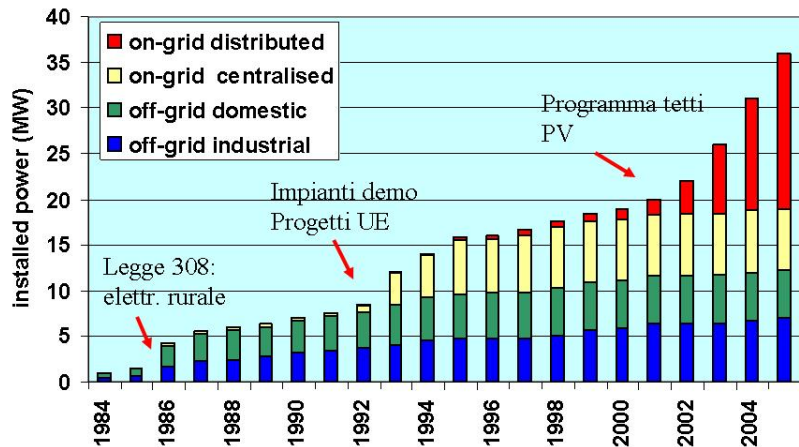


La forte crescita del 2005 è stata principalmente determinata dal forte sviluppo del settore registrato in Germania che per la prima volta, durante il 2005, con una nuova potenza installata pari a 600 MWp (circa 60.000 nuovi impianti) ha superato il Giappone (300 MWp) in quantità annuale installata. In Italia, si raggiunge nel 2004 la potenza totale installata di 37 MW, con una nuova capacità installata identica a quella installata nel 2005 (6 MWp)

Per quanto riguarda la situazione nel nostro paese, l'analisi delle applicazioni indica che in Italia, le aree di utilizzo più importanti, sono quelle delle applicazioni residenziali (elettrificazione rurale e illuminazione) con oltre 5,3 MW installati, delle applicazioni industriali (telecomunicazioni, segnalazione, dissalazione e protezione catodica) con circa 7 MW e delle applicazioni dimostrative con oltre 6,7 MW.

Le applicazioni di piccoli impianti connessi alla rete ammontano invece a 17 MW. In totale, attualmente risultano installati impianti per circa 37 MW.

POTENZA CUMULATA IN ITALIA

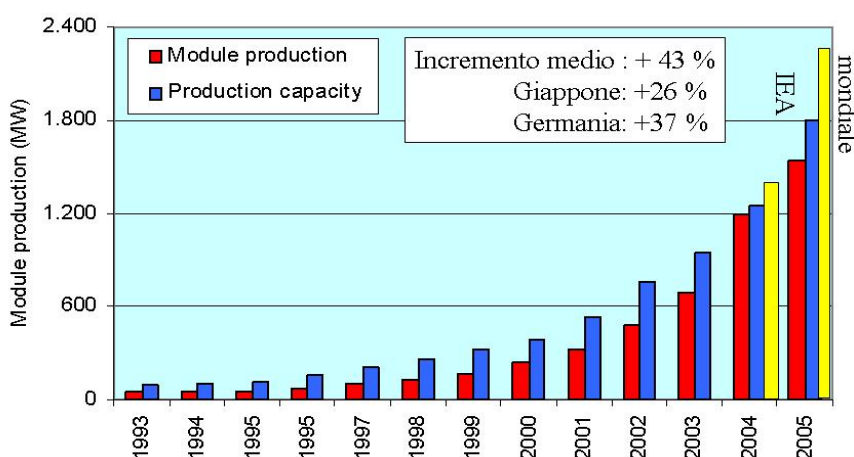


Il mercato

Il mercato mondiale dell'energia solare fotovoltaica continua ad espandersi rapidamente; nel 2005 la produzione di celle fotovoltaiche è passata dagli oltre 1200 MWp ai 2.000 MWp circa, con una

crescita superiore al 60% in un solo anno. Leader mondiale nella produzione di celle è il Giappone con una quota di oltre il 50% sul totale mondiale: le due maggiori aziende del settore, la Sharp e la Kyocera sono infatti giapponesi. L'Asia, nel suo complesso, ha una quota di mercato sempre più alta, pari al 58,6% a livello mondiale, con la Cina in crescita. Segue l'Europa, con il 25,8%, dove leader incontrastata è la Germania e gli Stati Uniti con una quota pari al 11,5%

LA PRODUZIONE INDUSTRIALE



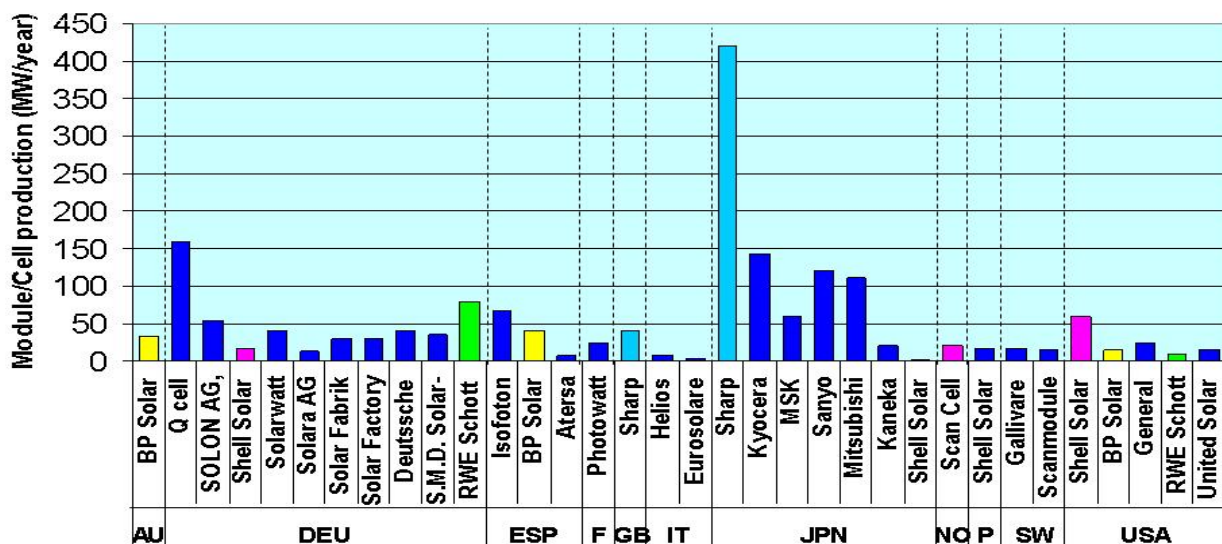
Leader incontrastata nella produzione di celle resta la società giapponese Sharp, con una quota di mercato pari al 25,8% (era del 26,4% nel 2003): nel 2005 sono state prodotte 420 MW di potenza (erano 198 MW nel 2003, con un incremento annuale del 64%). Le altre aziende leader sono Kyocera con 105 MW (8,3 % delle celle), BP Solar con 85 MW (6,8%) e Mitsubishi Electric con 75 MW (6%), che hanno una produzione complessiva di celle pari a 265 MW, ancora inferiore a quella

della sola Sharp. La Germania conta più di trenta aziende che producono oltre il 50% delle celle totali realizzate in Europa; l'azienda tedesca più grande è la RWE Solar, che tuttavia detiene il secondo posto dietro la spagnola Isofoton. La produzione di celle e moduli è concentrata in poche aziende; anche nel 2005 l'85% della produzione totale è da attribuire alle prime dieci del settore.

Per quanto riguarda la tecnologia, la quota di produzione di celle al silicio è in crescita e resta la predominante con il 94,2% del totale prodotto. Il silicio multi-cristallino con il 56,9% del mercato risulta essere il più utilizzato rispetto al mono-cristallino, all'amorfo e al film sottile. Tuttavia, nuova spinta sta avendo il silicio mono-cristallino che nel 2004 è passato ad una quota di mercato del 36,2% (era del 32,2% nel 2003), a causa della crescente domanda di celle a più elevato rendimento. Il Giappone è il maggiore produttore di celle al silicio multi-cristallino e a film sottile (silicio amorfo e altri materiali); per quanto riguarda le celle al silicio mono-cristallino, invece, il primo posto spetta all'Europa.

Per ciò che concerne gli inverter, invece, sul mercato internazionale sono attualmente presenti circa 300 modelli e taglie diverse. L'inverter non costituisce unicamente una componente che permette la conversione di corrente diretta in corrente alternata compatibile con la rete, ma un dispositivo in grado di monitorare l'intero sistema e la connessione in rete.

LE INDUSTRIE PV



Quasi la metà della produzione di inverter avviene in Europa, con la Germania che da sola produce il 48% del totale. Altri produttori significativi a livello mondiale sono gli USA con il 12% del mercato, il Giappone con il 9% e il Canada con il 7%. In crescita anche in questo settore la produzione dei paesi emergenti del sud-est asiatico (Taiwan 2%)

In Italia l'industria fotovoltaica risulta costituita da:

- 2 produttori di moduli fotovoltaici
 - Enitecnologie (ex Eurosolare). Realizzazione di celle e moduli fotovoltaici da wafer di m-Si e p-Si. Capacità 9 MW
 - Helios Technology. Realizzazione di celle e moduli fotovoltaici da wafer di m-Si. Capacità: 8 MW
- Alcune compagnie che assemblano e incapsulano celle fotovoltaiche o che realizzano particolari moduli (facciate, finestre, celle colorate). Capacità totale: 10 MW

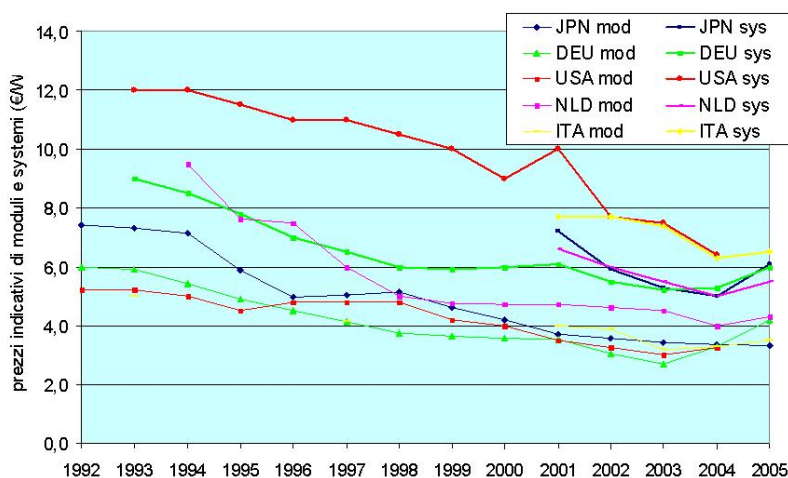
- 5 industrie elettroniche che realizzano inverter di piccola e media taglia per applicazioni fotovoltaiche stand alone e grid-connected
- Circa 100 imprese di installazione impianti PV (consulenza, progetto, approvvigionamento componenti installazione, manutenzione). Alcune di esse costituenti il “GIFI”, Gruppo Imprese Fotovoltaiche Italiane).

Le prospettive

Nei prossimi anni è ragionevole pensare a una diminuzione dei prezzi passando dagli attuali 3,2 \$/W ai 2 \$/W introducendo sia miglioramenti tecnologici sia sfruttando l'effetto di scala. I miglioramenti tecnologici si basano sostanzialmente su nuovi risultati della ricerca e sull'affinamento delle tecnologie produttive (uso razionale dei materiali, aumento dell'efficienza di conversione, innovazione tecnologica nell'assemblaggio dei moduli). Per quanto riguarda l'effetto di scala, è stato valutato che esso ha implicazioni positive fino a livelli di produzione pari a circa 20 MW/anno/turno.

Dal punto di vista delle tecnologie impiegate per la realizzazione dei moduli, oggi è preponderante quella basata sul silicio cristallino e tutto fa pensare che la situazione non muterà significativamente nell'arco dei prossimi anni. Nel medio-lungo termine, però, il silicio cristallino non sarà capace di far raggiungere al fotovoltaico un opportuno livello di competitività per la produzione di massa di energia; altre tecnologie già emergenti o ancora da esplorare, basate sui film sottili, sono le uniche che potranno consentire, qualora opportunamente sviluppate, di raggiungere nell'arco di uno o due decenni, quei costi che renderanno il fotovoltaico una vera opzione energetica.

PREZZI DI MODULI E SISTEMI IN ALCUNI PAESI



I costi di impianto

Sebbene ancora molto elevati, sono suscettibili ad abbassarsi notevolmente. Dal 1980 ad oggi sono stati fatti passi da giganti e per la fine di questo decennio è previsto un ulteriore dimezzamento dei costi. Le cause di tale riduzione sono da attribuirsi essenzialmente al fatto che questa tecnologia è ancora giovane, quindi sia dal punto di vista della ricerca che dell'ottimizzazione dei processi di produzione si possono avere repentini miglioramenti.

La peculiarità di un impianto fotovoltaico consiste nel forte impegno di capitale iniziale richiesto per la sua realizzazione e nelle basse spese di manutenzione. In Italia, il costo di investimento di un impianto chiavi in mano, operante in parallelo alla rete, si aggira intorno ai 6.000-7.000 €/kWp, considerando sinteticamente il costo totale composto dalle seguenti voci: moduli, inverter, strutture di supporto dei moduli, installazione e costi tecnici.

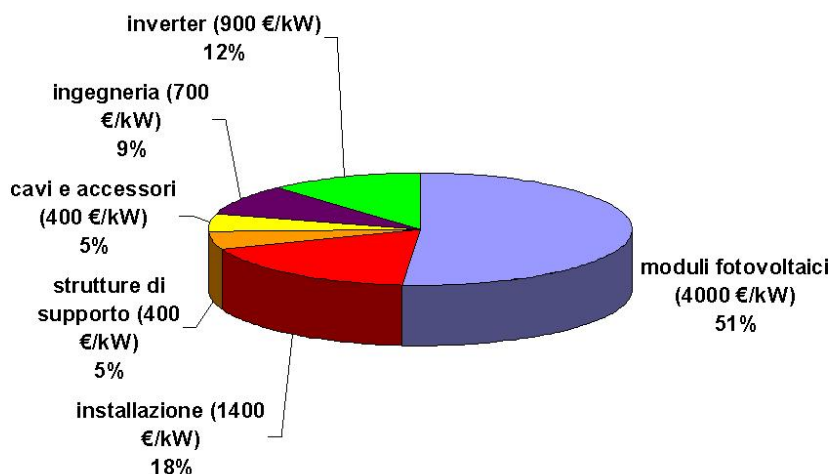
Nella maggior parte dei casi il costo dell'energia prodotta, 25-40 c€/kWh, risulta ancora superiore al costo dell'energia elettrica prodotta con una centrale convenzionale di grande dimensione. Per questo motivo, sebbene i costi siano fortemente diminuiti nell'ultimo decennio a seguito della

crescita del mercato e del miglioramento tecnologico, la convenienza all'installazione di un impianto fotovoltaico sembra dipendere ancora fortemente da eventuali forme di incentivi.

Nei costi del kWh prodotto da fotovoltaico non emergono però i fattori positivi che un tale impianto determina sull'utenza: minore dispersione nella rete di distribuzione, indipendenza dal gestore di rete; minore impatto sull'ambiente. Tutti questi elementi fanno del fotovoltaico la soluzione più praticabile per la generazione elettrica distribuita in ambiente urbano.

Appare quindi evidente come gli sviluppi di questa tecnologia siano

DISTRIBUZIONE DEI COSTI
impianti connessi alla rete di piccola taglia



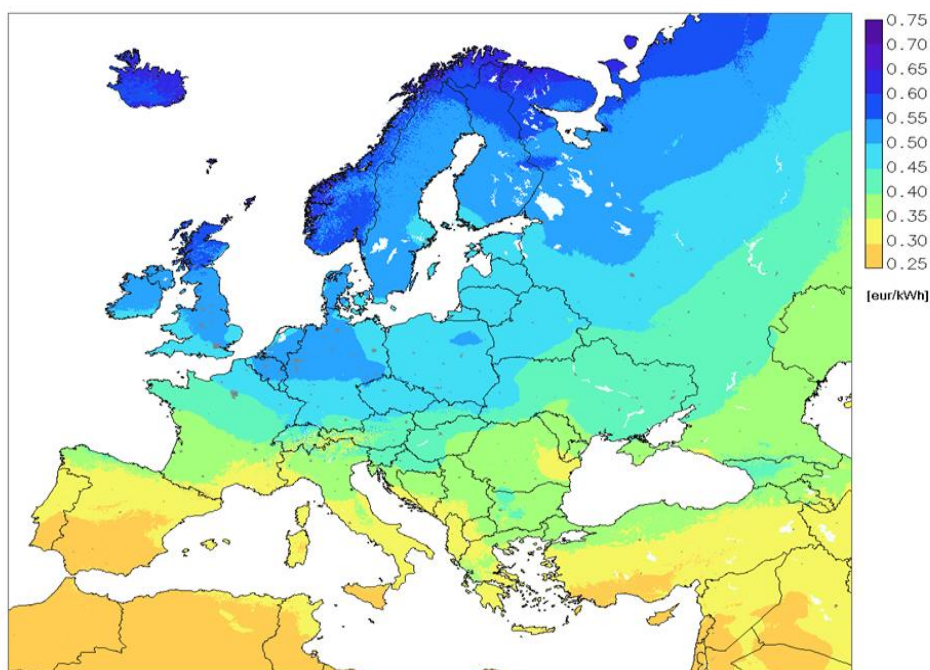
legati al sistema degli "usi finali" dell'energia piuttosto che a quelli della generazione di potenza. Sono infatti le applicazioni integrate con l'edilizia che possono contribuire in modo significativo al decollo di questa tecnologia; una indicazione in questo senso ci viene dal Giappone, paese che ha puntato in modo strategico su tale tecnologia il cui mercato sta rapidamente crescendo in un contesto di graduale diminuzione degli incentivi statali.

Il costo del kWh

Gli elementi che concorrono a formare il costo "attualizzato" del kWh sono il costo dell'investimento e il costo annuale di esercizio e di manutenzione, il fattore di attualizzazione dell'investimento e il numero di kWh prodotti dall'impianto in un anno.

Il fattore di attualizzazione dipende dalla durata dell'impianto, di solito stimata in 30 anni, e dal tasso di interesse reale,

COSTO DEL kWh
Piccoli sistemi collegati alla rete (<5 kWp)



cioè depurato del tasso di inflazione, posto pari al 3%.

Il costo attualizzato tiene conto degli oneri finanziari dell'investimento. Sia i costi d'investimento, sia quelli di esercizio e manutenzione dipendono in larga misura dalle dimensioni dell'impianto, dal tipo di applicazione per cui è costruito e dalla località in cui è installato.

Nel caso di sistemi fotovoltaici integrati negli edifici e collegati direttamente alla rete in bassa tensione, a fronte di un costo di impianto di circa 6.000 ÷ 7.000 €/kW e di un costo di manutenzione paria 100 €/anno si ottiene un costo attualizzato dell'energia elettrica prodotta quantificabile in circa 0,3 €/kWh in condizioni di soleggiamento medio (circa 1.600 kWh/m² per anno).

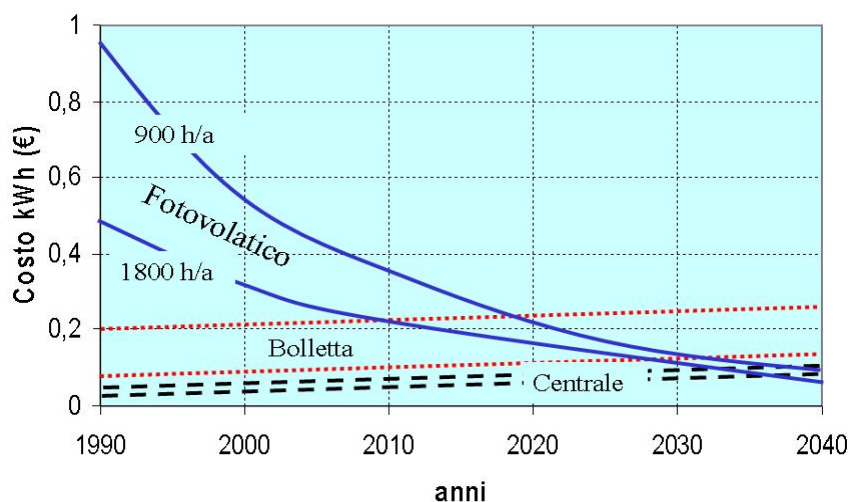
Nel caso invece di sistemi fotovoltaici per utenze isolate, i cui costi sono dell'ordine dei 9 - 11 k€/kWp, il corrispondente costo attualizzato del kWh è dell'ordine delle 0,5 - 0,7 €

Il valore aggiunto del fotovoltaico

Il costo del kWh da fonte fotovoltaica viene "istintivamente" confrontato con quello pagato dall'utente alle società elettriche distributrici di elettricità. Tale costo è, oggi, diverso a seconda del tipo di utenza e dei livelli di consumo; un valore medio per la famiglia tipo italiana è dell'ordine dei

15 c€/kWh. Per il caso degli impianti isolati il confronto non è significativo, a fronte dei costi di allacciamento alla rete di distribuzione. Per quanto riguarda gli impianti connessi alla rete, il costo del kWh fotovoltaici è invece circa doppio rispetto a quello pagato alla società elettrica. Bisogna tuttavia tenere conto del fatto che nessuno può prevedere quale

CONFRONTO TRA FOTOVOLTAICO - BOLLETTA - CENTRALE



sarà il costo dell'energia negli anni a venire e dei vantaggi, in termine di valore aggiunto, offerti dalla fonte fotovoltaica. In primo luogo gli impianti fotovoltaici hanno un valore aggiunto di tipo elettrico nel senso che migliorano i parametri della rete (picchi di assorbimento, perdite di trasmissione), possono fornire energia in situazioni di emergenza e nel caso di utenze isolate non richiedono spese di allacciamento alla rete e trasporto del carburante. Nel campo ambientale il valore aggiunto del fotovoltaici si traduce in riduzione delle emissioni e piogge acide. Da un punto di vista architettonico l'elemento fotovoltaico sostituisce i componenti tradizionali di rivestimento, contribuisce ad aumentare l'isolamento termico e acustico, protegge dall'acqua e dal fuoco e riflette le onde elettromagnetiche. Infine, da un punto di vista socio-economico il fotovoltaici crea lavoro indotto, migliora le condizioni di vita e può avere ricadute tecnologiche in altri settori.

Se a questi vantaggi si aggiungono le incentivazioni previste per il futuro, si può certamente concludere che i sistemi solari fotovoltaici, sia isolati che connessi alla rete, si possono considerare già oggi, una interessante opzione energetica alla portata di un gran numero di utilizzatori.

I programmi di diffusione

In considerazione dell'elevata valenza strategica del fotovoltaico, molti paesi hanno deciso di farne oggetto di impegnativi Programmi di sviluppo.

L'obiettivo è il raggiungimento della competitività economica attraverso i miglioramenti tecnologici e il fattore di scala.

Le strategie e le motivazioni riguardano:

- la costituzione di un mercato di dimensioni significative stabile nel tempo
- il rafforzamento delle industrie interessate
- la ricaduta occupazionale

In Italia, il decreto 28/7/05 prevede incentivazioni in conto energia per impianti di potenza nominale: >1 kW e < 1 MW relativi a nuove costruzioni, rifacimenti totali (impianti > 20 anni) e potenziamenti (impianti > 5 anni, 2 anni con il decreto 6/2/06)

Gli impianti devono essere collegati alla rete elettrica (BT o MT), ivi incluse le piccole reti isolate (consumi < 2,5 TWh/anno) e realizzati nel rispetto delle norme tecniche e requisiti di efficienza

La copertura risorse sarà relativa al gettito della componente tariffaria A3 (Prelievo sulle bollette di tutti i consumatori < 0,14 c€/kWh). Riguardo alla cumulabilità con altri incentivi non sono ammesse incentivazioni in conto capitale > 20% mentre le tariffe incentivanti vengono ridotte del 30% se si beneficia della detrazione del 36% "ristrutturazioni".

L'aggiornamento delle tariffe è legato al tasso di inflazione e durano 20 anni. E' prevista la riduzione della tariffa pari al 2% per anno, dopo il 2007 (5% con il decreto 6/2/06).

I tempi per la realizzazione degli impianti sono 1 anno per impianti <50 kW e 2 anni per quelli >50 kW.

IL CONTO ENERGIA
(Decreto 28/7/05)

Taglia impianto (kW)	Tariffe incentivanti (€/kWh)	Ulteriore beneficio
1 < 20	0,445	Net metering (15 c€/kWh)
20 < 50	0,46	Autoconsumo e/o cessione (9,5 c€/kWh)
50 < 1000	0,49 max.	Autoconsumo e/o cessione (9,5 - 7 c€/kWh)

Il meccanismo di aggiudicazione è temporale per impianti < 50 kW e al ribasso (con cauzione per quelli più grandi).

Con il decreto 6/2/06, il limite di riconoscimento delle tariffe incentivanti è stato incrementato da 100 a 500 MW dei quali : 360 MW (< 50 kWp) + 140 MWp (> 50 kWp)

Il limite annuale è stato fissato invece ad 80 MW mentre l'obiettivo finale al 2015 è stato spostato da 300 MW a 1.000

MW. Ulteriori novità del decreto prevedono la cauzione ridotta a 1.000 €/kW e dopo l'accettazione domanda (esclusi enti locali), la possibilità di utilizzare moduli a film sottile, tariffe incrementate del 10% per impianti integrati in edifici, limitazione produzione incentivata nel caso di scambio (nei limiti dell'energia resa disponibile alle utenze).

Infine, gli impianti <20 kW possono optare per la cessione in rete.