

Progetto "IL SOLE A SCUOLA"



## **ASPETTI TECNICI ED ECONOMICI DELLA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA**

**Ing. Salvatore Castello**

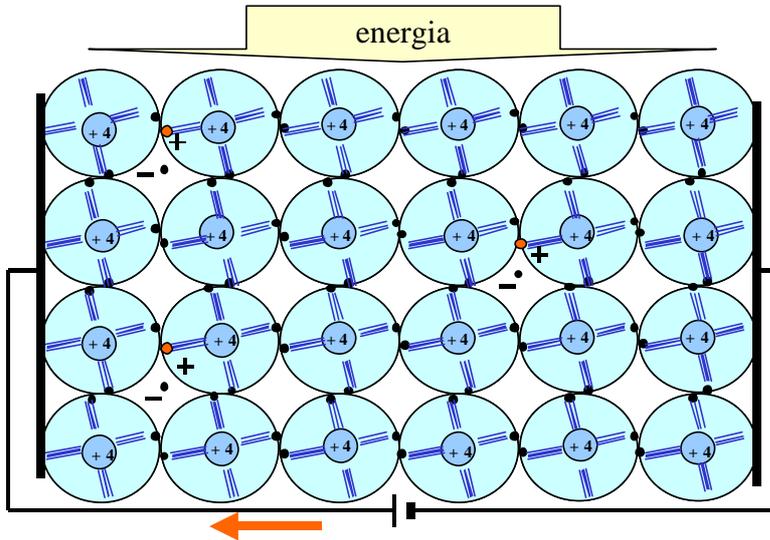
**ENEA**

## I DISPOSITIVI FOTOVOLTAICI

### La cella fotovoltaica

La conversione della radiazione solare in energia elettrica avviene nella cella fotovoltaica. Essa è costituita da una sottile fetta di un materiale semiconduttore, molto spesso silicio.

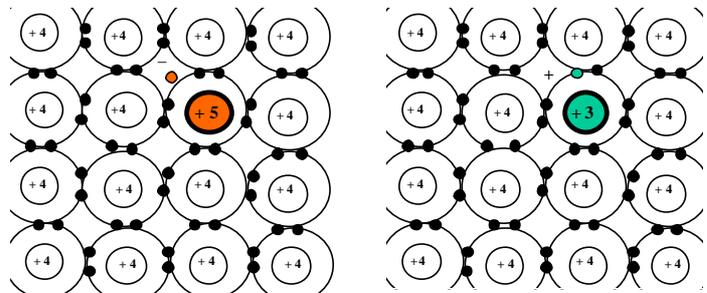
### STRUTTURA CRISTALLINA DEL SILICIO



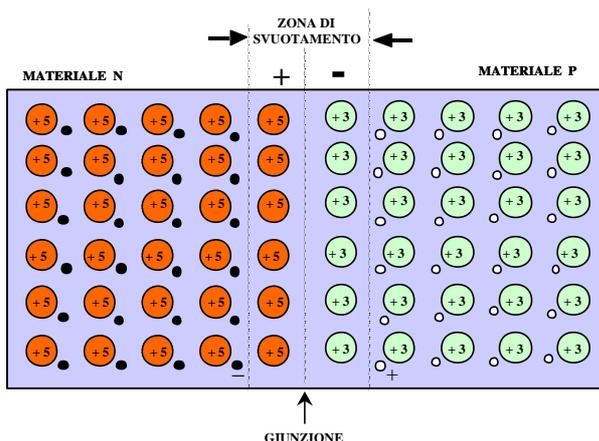
Quando un fotone dotato di sufficiente energia viene assorbito nella cella, nel materiale semiconduttore di cui essa è costituita si crea una coppia di cariche elettriche di segno opposto, un "elettrone" (cioè una carica di segno negativo) ed una "lacuna" (carica positiva). Si dice allora che queste cariche sono "disponibili per la conduzione di elettricità". Per generare effettivamente una corrente elettrica, però, è

necessaria una differenza di potenziale, e questa viene creata grazie all'introduzione di piccole quantità di impurità nel materiale che costituisce le celle. Queste impurità, chiamate anche "droganti", sono in grado di modificare profondamente le proprietà elettriche del semiconduttore.

### SILICIO DI TIPO N E DI TIPO P

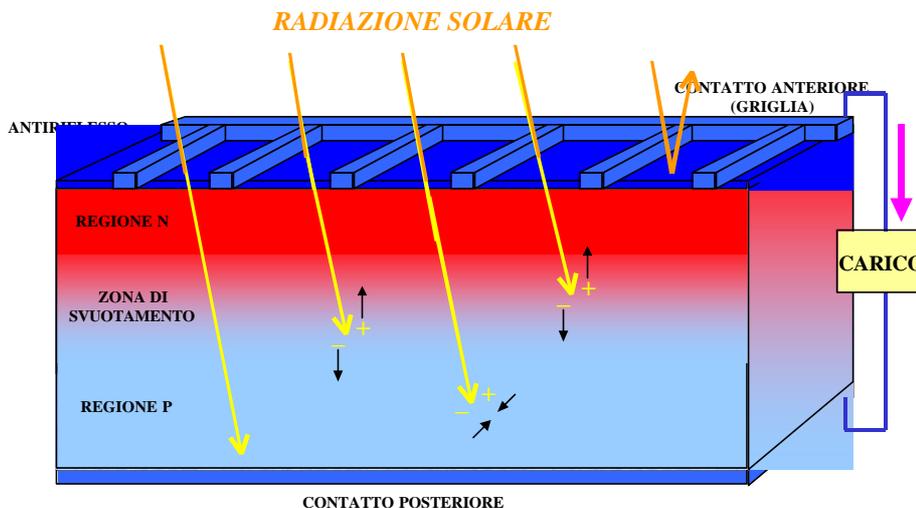


### GIUNZIONE P-N



Se il materiale semiconduttore, come comunemente accade, è il silicio, introducendo atomi di fosforo, si ottiene la formazione di silicio di tipo "n", caratterizzato da una densità di elettroni liberi (cariche negative) più alta di quella presente nel silicio normale (intrinseco). La tecnica del drogaggio del silicio

## STRUTTURA DELLA CELLA



con atomi di boro porta, invece, al silicio di tipo “p” in cui le cariche libere in eccesso sulla norma sono di segno positivo.

Una cella fotovoltaica richiede l’intimo contatto, su una grande superficie, di due strati di silicio p ed n. Nella zona di contatto tra i due tipi di silicio, detta “giunzione p-n”, si ha la formazione di un forte campo elettrico.

Le cariche elettriche positive e negative generate, per effetto fotovoltaico, dal bombardamento dei fotoni costituenti la luce solare,

nelle vicinanze della giunzione vengono separate dal campo elettrico. 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.

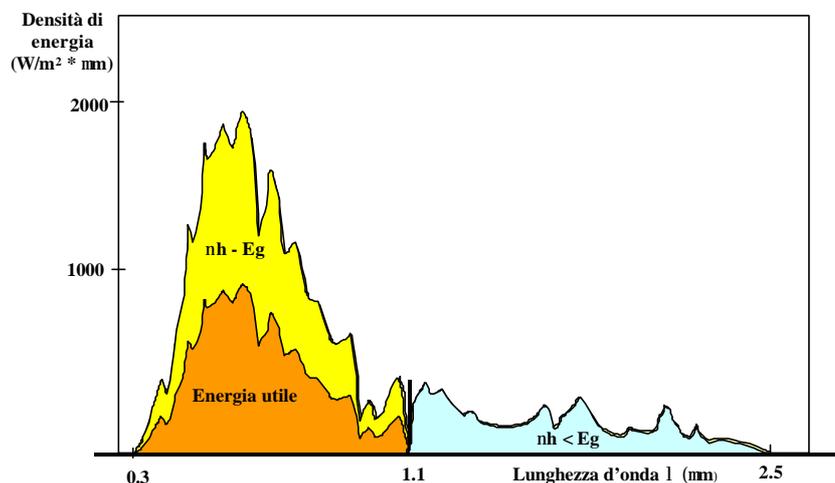
Ai fini del funzionamento delle celle, i fotoni di cui è composta la luce solare non sono tutti equivalenti: per poter essere assorbiti e partecipare al processo di conversione, un fotone deve possedere un’energia ( $h\nu$ ) superiore a un certo valore minimo, che dipende dal materiale di cui è costituita la cella ( $E_g$ ). In caso contrario, il fotone non riesce ad innescare il processo di conversione.

### L’efficienza della cella

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 trasformata 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

## SPETTRO DELLA RADIAZIONE SOLARE

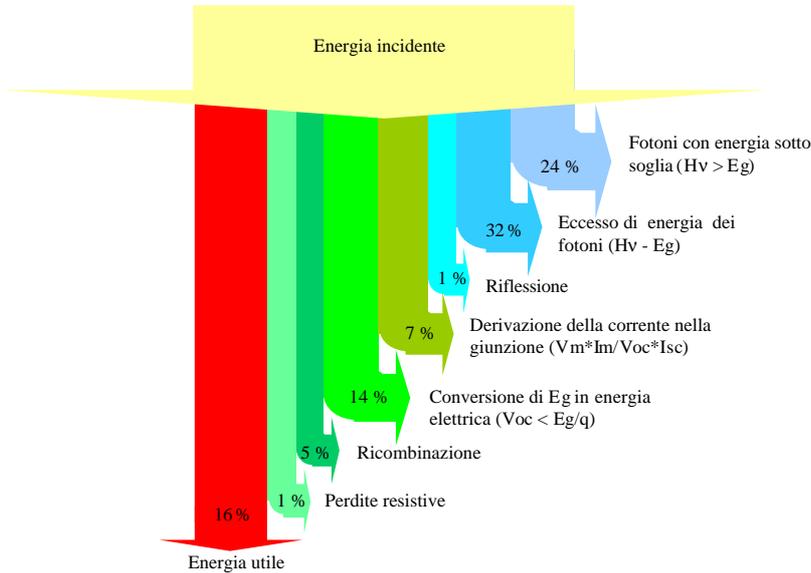


tipo tecnologico, derivano dal particolare processo adottato per la fabbricazione del dispositivo fotovoltaico.

Le cause di inefficienza sono essenzialmente dovute al fatto che:

- non tutti i fotoni posseggono una energia sufficiente a generare una coppia elettrone-lacuna;
- l'eccesso di energia dei fotoni non genera corrente ma viene dissipata in calore all'interno della cella;
- non tutti i fotoni penetrano all'interno della cella, in parte vengono riflessi;
- una parte della corrente generata non fluisce al carico ma viene shuntata all'interno della cella
- solo una parte

### L'EFFICIENZA DELLA CELLA



dell'energia acquisita dall'elettrone viene trasformata in energia elettrica

- non tutte le coppie elettrone-lacuna generate vengono separate dal campo elettrico di giunzione, una parte si ricombina all'interno della cella;
- la corrente generata è soggetta e perdite conseguenti alla presenza di resistenze serie.

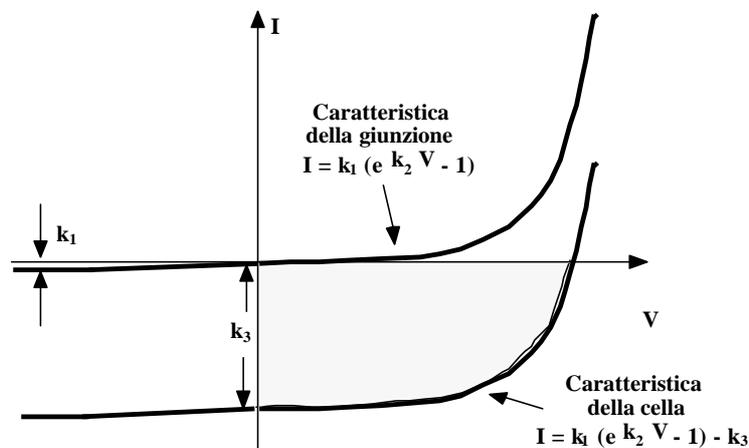
### Le caratteristiche elettriche della cella

La cella fotovoltaica, quando non viene illuminata, ha un comportamento analogo a quello di un diodo a semiconduttore.

In

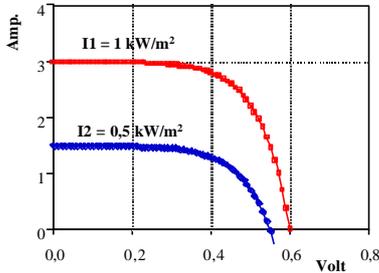
queste condizioni la tensione e la corrente sono legati da una relazione di tipo esponenziale ottenuta risolvendo l'equazione conservazione carica. Quando la cella viene illuminata, la giunzione diviene una sorgente di coppie

### CARATTERISTICA I-V DELLA CELLA

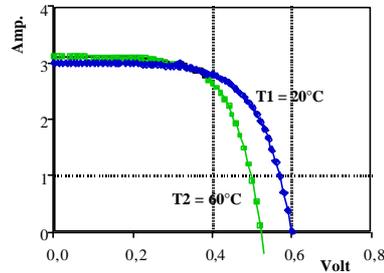


della della la

## CARATTERISTICHE I-V DELLA CELLA



Caratteristiche I-V a differenti intensità di irraggiamento



Caratteristiche I-V a differenti temperature

elettrone-lacuna pertanto ha un comportamento analogo a quello di un diodo con in parallelo un generatore di corrente. Graficamente, la caratteristica tensione corrente di una cella illuminata risulta pari a quella di un diodo traslata però (verticalmente) di una quantità pari alla corrente fotogenerata. Poiché la corrente fotogenerata varia con

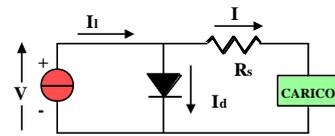
l'irraggiamento e con la temperatura (in misura minore), la caratteristica tensione-corrente della cella risulta influenzata da questi parametri.

## CARATTERISTICHE ELETTRICHE DELLA CELLA

### EQUAZIONE DELLA CELLA

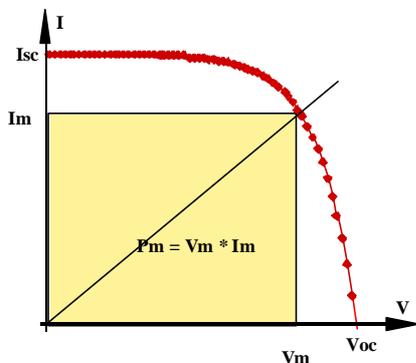
$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{q(V + R_s I)}{N k T}} - 1 \right)$$

- $I_L$  corrente fotogenerata
- $I_0$  corrente inversa di satur.
- $q$  carica dell'elettrone
- $R_s$  resistenza serie
- $N$  fattore di idealità (1 - 2)
- $k$  costante di Boltzman



CIRCUITO EQUIVALENTE DELLA CELLA

## PARAMETRI DELLA CELLA



- $I_{sc}$  corrente di corto circuito
- $V_{oc}$  tensione a circuito aperto
- $I_m$  corrente nel punto di massima potenza
- $V_m$  tensione nel punto di massima potenza
- $P_m$  massima potenza
- $ff$  fattore di riempimento:  $P_m / I_{sc} * V_{oc}$
- $\eta$  efficienza:  $P_m / \text{potenza incidente}$

### La tecnologia del silicio

Attualmente il materiale più usato è lo stesso silicio adoperato dall'industria elettronica, il cui processo di fabbricazione presenta costi molto alti, non giustificati dal grado di purezza richiesti dal fotovoltaico, che sono inferiori a quelli necessari in elettronica.

Il processo più comunemente impiegato per ottenere silicio monocristallino per uso elettronico parte dalla preparazione di silicio metallurgico (puro al 98% circa), mediante riduzione della silice ( $\text{SiO}_2$ ) con carbone in forni ad arco.

Dopo alcuni processi metallurgici intermedi consistenti nella:

- purificazione del silicio metallurgico a silicio elettronico (processo Siemens);
- conversione del silicio elettronico a silicio monocristallino (metodo Czochralski).

vengono ottenuti lingotti cilindrici (da 13 a 30 cm di diametro e 200 cm di lunghezza) di silicio mono cristallino, solitamente drogato p mediante l'aggiunta di boro.

Questi lingotti vengono quindi 'affettati' in wafer di spessore che va dai 0,25 ai 0,35 mm.

Da alcuni anni l'industria fotovoltaica sta sempre più utilizzando il silicio policristallino, che unisce ad un grado di purezza comparabile a quello del monocristallino costi inferiori. I lingotti di policristallino, anch'essi di solito drogati p, sono a forma di parallelepipedo e vengono sottoposti al taglio, per ottenerne fette di  $0,2 \div 0,35$  mm di spessore.

## TECNOLOGIA DEL SILICIO

- **RIDUZIONE DELLA QUARZITE A SILICIO METALLURGICO**
  - forno a arco  
 $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + 2\text{CO}$
- **PURIFICAZIONE DEL SELICIO METALLURGICO A SILICIO ELETTRONICO**
  - distillazione frazionata (processo Siemens)  
 $\text{Si} + 3\text{HCl} = \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$   
distillazione di:  $\text{SiHCl}_3$   
 $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 = \text{Si} + 3\text{HCl}$
- **CONVERSIONE DEL SILICIO ELETTRONICO A SILICIO MONOCRISTALLINO**
  - accrescimento (metodo Czochralski)
- **RIDUZIONE DEL LINGOTTO IN FETTE**
  - taglio

### La fabbricazione della cella

Per fabbricare la cella, 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 fosforo, che droga n, con una profondità di giunzione pari a  $0,3-0,4 \mu\text{m}$ ).

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

## TECNOLOGIA DI FABBRICAZIONE DELLA CELLA

- **PREPARAZIONE DELLA FETTA**
  - attacco chimico
- **FORMAZIONE DELLA GIUNZIONE**
  - diffusione del fosforo a  $800 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $(4\text{POCl}_3 + 3\text{O}_2 = 2\text{P}_2 + 6\text{Cl}_2 + 5\text{O}_2)$
- **ELIMINAZIONE DELL'EFFETTO DI SHUNT DEL BORDO**
  - attacco chimico
- **REALIZZAZIONE DELLA GRIGLIA FRONTALE E DEL CONTATTO POSTERIORE**
  - serigrafia
- **DEPOSIZIONE DELLO STRATO ANTIRIFLESSO**
  - evaporazione o testurizzazione

sottile strato antiriflesso, per es., di  $\text{TiO}_2$ .

### Le celle commerciali

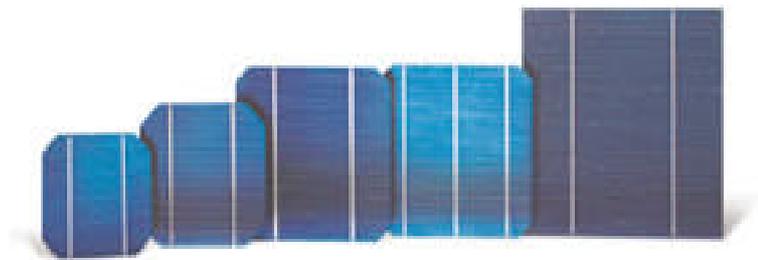
In pratica la tipica cella fotovoltaica è costituita da un sottile wafer, di spessore di  $0,25\div 0,35$  mm circa, di silicio mono o policristallino, opportunamente drogato. Essa è generalmente di forma quadrata e di superficie pari a circa  $100\text{ cm}^2$ , (sino a 225) e si comporta come una minuscola batteria, producendo - nelle condizioni di soleggiamento standard ( $1\text{ kW/m}^2$ ) e a  $25^\circ\text{C}$  - una corrente di 3 A, con una tensione di 0,5 V, quindi una potenza di 1,5 Watt.

L'attuale processo di fabbricazione delle celle si basa sull'utilizzo del silicio:

- monocristallino dell'industria elettronica, che richiede materiale molto puro mentre le esigenze di purezza della tecnologia fotovoltaica sono molto inferiori.
- policristallino ottenuto dalla fusione degli scarti dell'industria elettronica, solidificazione direzionale e riduzione del lingotto in fette

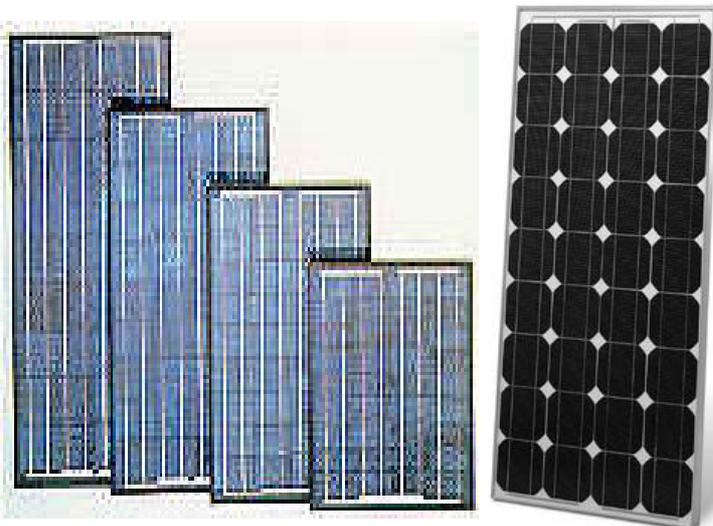
In passato, i piccoli ma sempre crescenti volumi di produzione caratteristici dell'attuale fase di sviluppo dell'industria fotovoltaica sono stati perfettamente compatibili con la quantità, ovviamente limitata, di tali materiali di scarto. Però, per offrire un contributo veramente significativo alla produzione di energia elettrica totale, il fotovoltaico deve raggiungere volumi di produzione enormemente superiori agli attuali e assolutamente non compatibili con la dipendenza da un materiale prodotto da altre industrie e per altri scopi. L'industria fotovoltaica avrà bisogno di materia prima per le celle, a basso costo, in gran quantità, preparato espressamente per la fabbricazione delle celle.

### CELLE COMMERCIALI



### La fabbricazione del modulo

#### I MODULI FOTOVOLTAICI



Le celle solari 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.

### I moduli commerciali

Il modulo rappresenta il componente elementare dei sistemi fotovoltaici. I moduli in commercio attualmente più diffusi (con superficie attorno a 0,5 - 07 m<sup>2</sup>), che utilizzano celle al silicio mono e policristallino, prevedono tipicamente 36 celle collegate elettricamente in serie. Il modulo così costituito ha una potenza che va dai 50 agli 80 Wp, a seconda del tipo e dell'efficienza delle celle, e tensione di lavoro di circa 17 volt con corrente di circa 3 - 4 A.

I moduli comunemente usati nelle applicazioni commerciali hanno un rendimento complessivo del 12-13%. È recentemente cresciuta la domanda di moduli di potenza superiore, sino a 150÷160 Wp, utili per l'integrazione di pannelli nella struttura di rivestimento di edifici.

### PROCESSO DI FABBRICAZIONE DEL MODULO

- ASSEMBLAGGIO IN SERIE/PARALLELO DELLE CELLE
- LAMINAZIONE
- POLIMERIZZAZIONE DELL' INCAPSULANTE
- MONTAGGIO DELLA CORNICE
- FISSAGGIO DELLA SCATOLA DI GIUNZIONE
- CONTROLLO DEL MODULO

### MODULI COMMERCIALI

#### • Caratteristiche delle celle

- MATERIALE	Silicio mono o poli
- AREA	100 cm <sup>2</sup>
- SPESSORE	0,3 - 0,4 mm
- TENSIONE	0,5 V
- CORRENTE	2,8 - 3,2 A
- POTENZA	1,4 - 1,6 W
- EFFICIENZA	14 - 16 %

#### • Caratteristiche del modulo

- CONFIGUR. CELLE	4 x 9
- AREA	0,4 - 0,5 m <sup>2</sup>
- PESO	6 - 7 kg
- TENSIONE	18 V
- POTENZA	50 - 57 W
- EFFICIENZA	12 - 14 %

### 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.

In ordine alla fabbricazione di celle innovative, si tende, ad es., a mettere a punto procedimenti per il taglio delle fette di materiale semiconduttore di grande area (225 cm<sup>2</sup>) e di piccolo spessore (0,1 mm) che rendano minimi gli sprechi di materia prima.

Riguardo ai nuovi materiali si è puntato a sviluppare varie tecnologie, basate su diversi materiali, semplici e composti. Le più rilevanti sono due, l'una utilizza, quali costituenti del wafer, il silicio cristallino di grado solare, l'altra utilizza i "film sottili".

La tecnologia del silicio di grado solare, prevede la purificazione del silicio metallurgico 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 è possibile inoltre realizzare celle con efficienza dell' 11- 12%.

La seconda tecnologia è quella a "film sottile".

### I film sottili

Questa tecnologia sfrutta la deposizione (ad esempio su vetro) di un sottilissimo strato di materiali semiconduttori, in pratica il silicio amorfo ed alcuni semiconduttori composti

<b>I FILM SOTTILI</b>	
<p><b>CARATTERISTICHE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo di materiale limitato (spessore 0,001 mm) 0,02 g/W (cristallino: 4 g/W)</li> <li>• Moduli leggeri e flessibili</li> <li>• Fabbricazione del modulo con un unico processo</li> <li>• Potenzialità di basso costo</li> <li>• Possibilità di realizzare celle tandem</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>SILICIO AMORFO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- produzione industriale</li> <li>- disponibilità di materiale</li> <li>- nessuna tossicità</li> <li>- applicazioni optoelettronica</li> <li>- mercato dei gadget</li> <li>- <b>bassa efficienza</b></li> <li>- <b>instabilità</b></li> <li>- <b>prezzo non inferiore al c-Si</b></li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>FILM POLICRISTALLINI</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- produzione da laboratorio</li> <li>- esclusivamente fotovoltaico</li> <li>- efficienza di cella elevata</li> <li>- buona stabilità</li> <li>- <b>limitata disponibilità di materiale</b></li> <li>- <b>potenziale inquinamento ambientale</b></li> <li>- <b>bassa resa di processo</b></li> </ul> </li> </ul>

policristallini, quali il diseleniuro di indio e rame -CuInSe<sub>2</sub>- e il telluriuro di cadmio -CdTe- (materiali composti).

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),

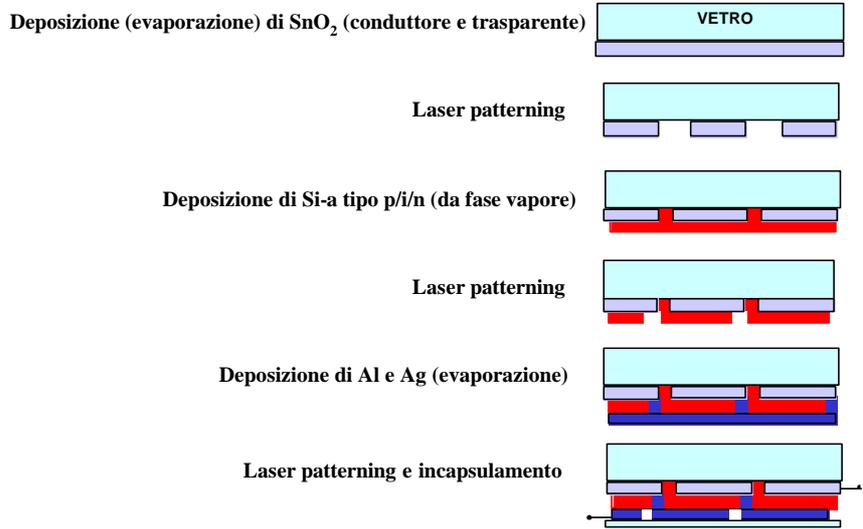
anche se resta da superare l'ostacolo rappresentato dalla bassa efficienza. Questa tecnologia potrebbe rappresentare la carta vincente per trasformare il fotovoltaico in una fonte energetica in grado di produrre energia su grande scala. La tecnologia a film sottile può risolvere il problema dell'approvvigionamento del materiale, in quanto, comportando un consumo di materiale molto limitato (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.

### La fabbricazione di moduli al silicio amorfo

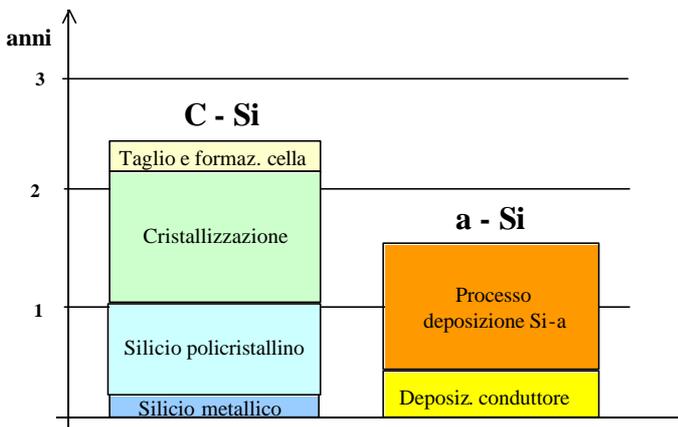
Su un substrato di vetro viene depositato uno strato di materiale trasparente e conduttore (ad es. ossido di stagno). Tale strato viene parzialmente asportato ottenendo in tal modo una serie di elettrodi che costituiscono i contatti anteriori delle singole giunzioni p-n. Successivamente viene depositato in sequenza il silicio amorfo di tipo p, intrinseco e di tipo n. Anche in seguito al deposito del silicio amorfo si procede alla parziale asportazione del materiale (mediante laser spattering) in modo da realizzare una serie di giunzioni p-n. Infine, tramite deposizione e parziale asportazione di alluminio o argento viene realizzata una nuova serie di elettrodi che costituiscono i contatti posteriori delle giunzioni. In questo modo, mediante un unico processo che prevede varie sequenze di deposizione e di

**SEQUENZA DI FABBRICAZIONE DI MODULI Si-a**



asportazione di materiale si realizza un insieme di giunzioni p-n collegate in serie fra loro

**ENERGY PAY - BACK TIME**



**Il pay-back time**

Equivale al periodo di tempo che deve operare il dispositivo fotovoltaico per produrre l'energia che è stata necessaria per la sua realizzazione. Per le celle al silicio cristallino il pay-back time corrisponde a circa 2,5 anni. In particolare, alla fase di cristallizzazione corrisponde un pay-back time di circa un anno mentre alle fasi di realizzazione del silicio metallurgico, di purificazione, di taglio e formazione della giunzione corrisponde complessivamente un pay-back

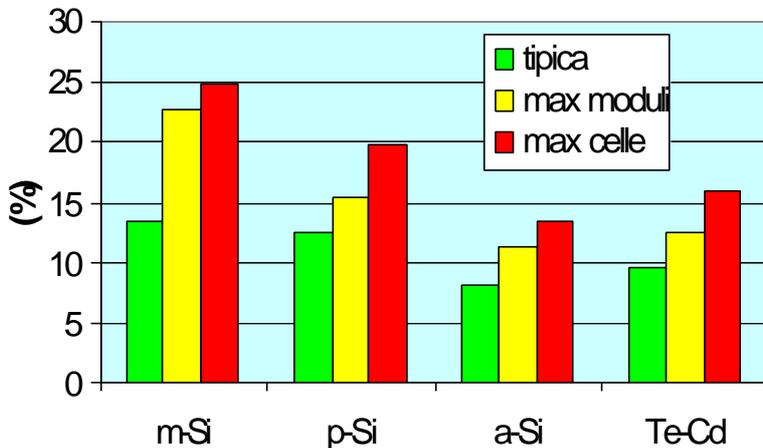
time pari a circa 1,5 anni.

Il pay-back time dei moduli al silicio amorfo corrisponde invece a 1,5 anni ed è così ripartito: 1 anno per il processo di deposizione del silicio amorfo e 0,5 anni per la deposizione dei contatti.

## L'efficienza dei moduli

L'efficienza di conversione dei moduli fotovoltaici al silicio monocristallino è dell'ordine del 13-14%, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 23% per i moduli e 25% per le singole celle.

### EFFICIENZA DI CELLE E MODULI



I valori di efficienza dei moduli al silicio policristallino si attestano tipicamente intorno al 12%. Anche in questo caso esemplari realizzati in laboratorio raggiungono valori di efficienza pari al 20%.

Per quanto riguarda i moduli al silicio amorfo i valori dell'efficienza sono pari al 7 - 8% su superfici che vanno da 0,5 a 1 m<sup>2</sup>. A livello di

laboratorio e su superfici più piccole vengono realizzate celle con efficienza pari al 14%

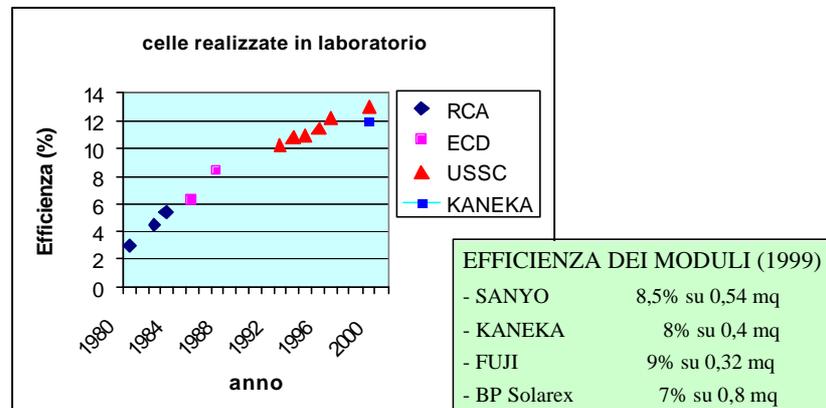
## La produzione dei moduli

Nell'ultimo decennio il mercato mondiale è cresciuto, in media, di oltre il 20% all'anno. In particolare si è passati da una produzione di 50 MW nel 1993 a circa 340 MW dell'anno 2001.

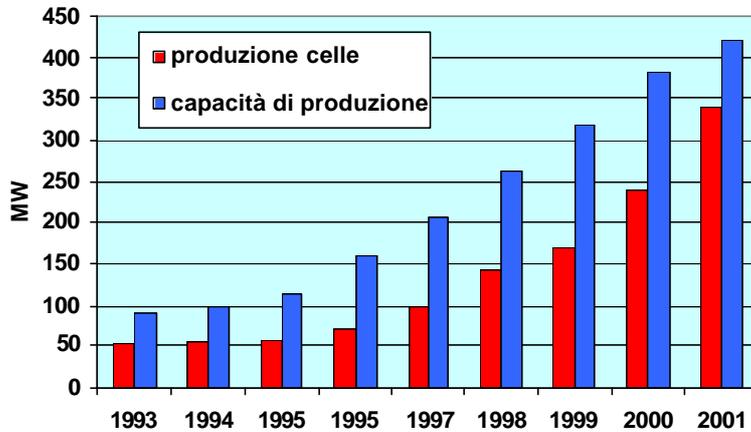
La produzione dell'industria manifatturiera europea,

con 55 MWp, rappresenta il 16% del mercato totale (pari a 340 MWp), mentre gli USA e il Giappone hanno prodotto nel 2001, rispettivamente, 105 MWp (31%) e 180 MWp (53%).

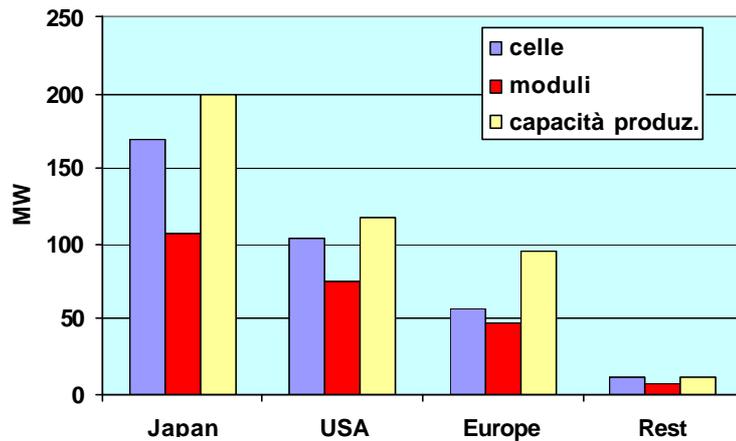
## EFFICIENZA DI CELLE E MODULI IN a-Si



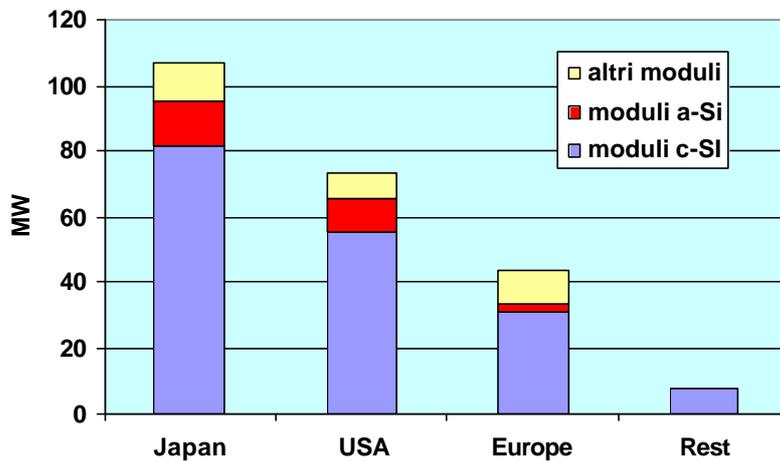
## LA PRODUZIONE INDUSTRIALE



## LA PRODUZIONE PER AREE GEOGRAFICHE NEL 2001



## LA PRODUZIONE PER TECNOLOGIE (2001)



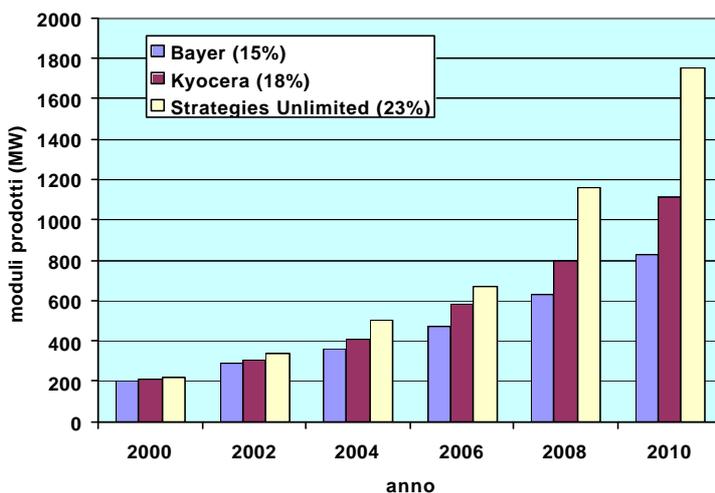
## LE PRINCIPALI INDUSTRIE

Country	Company	Technology Type	Total Production	
			Cell	Module
AUS	BP Solar	mc-Si,sc-Si	10	6,2
DEU	30 companies	mc-Si, sc-Si, a-Si	31,8	28,94
FRA	Photowatt International	mc-Si	13,6	5
GBR	Intersolar	a-Si	1,6	1,6
ITA	Eurosolare	mc-Si,sc-Si	4,5	4,5
	Helios Technology	sc-Si	2	2
JPN	Kyocera	mc-Si	55	54
	Sharp	mc-Si, sc-Si, a-Si	75	
	Sanyo Electric	a-Si/sc-Si	14	14
	Canon	a-Si/sc-Si	1,59	
	Mitsubishi Electric	mc-Si	14	14
	Kaneka	a-Si	8	8
	Matsushita Battery	CdS/CdTe,mc-Si	1,2	1,2
	MSK	mc-Si,sc-Si		13
	Matsushita Seiko	a-Si	0,6	0,6
NLD	Shell Solar Energy	mc-Si	3,4	3,4
USA	Shell Solar	sc-Si CIS Cd-Te	39	31
	BP Solar	mc-Si a-Si	24,7	22
	AstroPower	sc-Si Si film	27	11
	ASE Americas	edge fed growth -Si	8	5
	United Solar Systems	a-Si	3,8	3,8
	Evergreen Solar	String ribbon	0,4	0,4

### Previsioni di mercato

Studi condotti dalla Bayer, Kyocera e Strategies Unlimited indicano una crescita media, nel periodo 2000 – 2010 che oscilla tra il 15 e il 23%. Previsioni più ottimistiche prevedono un incremento di produzione di moduli fotovoltaici che va dai 250 MW del 2000 agli oltre 1700 MW del 2010. Previsioni più contenute stimano invece una produzione di moduli superiore a 800 MW per l'anno 2010.

### PREVISIONE DI MERCATO CONFRONTO TRA DIVERSI STUDI



### Ripartizione del mercato per tecnologia

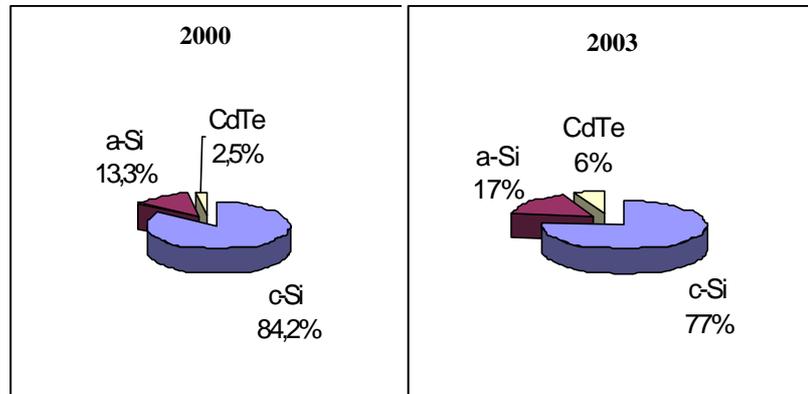
Attualmente la quota di mercato del silicio cristallino è pari a circa l'84% mentre quella del silicio amorfo è intorno al 13%. Nei prossimi anni è prevista una

diminuzione della quota di mercato del silicio cristallino (circa 77% nel 2003) a vantaggio di un incremento della quota di mercato dei film sottili (17% per il silicio amorfo e 6% per i policristallini composti).

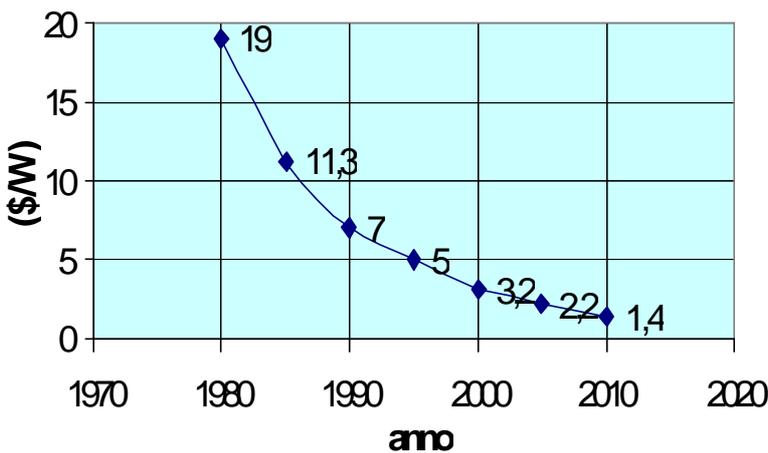
**L'evoluzione dei prezzi**

I costi dei moduli fotovoltaici, sebbene ancora molto elevati, sono suscettibili di abbassarsi notevolmente, secondo il trend degli ultimi due decenni, grazie al progredire della ricerca, che certamente permetterà di trovare materiali sempre meno costosi e con rendimenti di conversione energetica sempre più interessanti.

**RIPARTIZIONE DEL MERCATO PER TECNOLOGIA**



**EVOLUZIONE DEI PREZZI DEI MODULI**



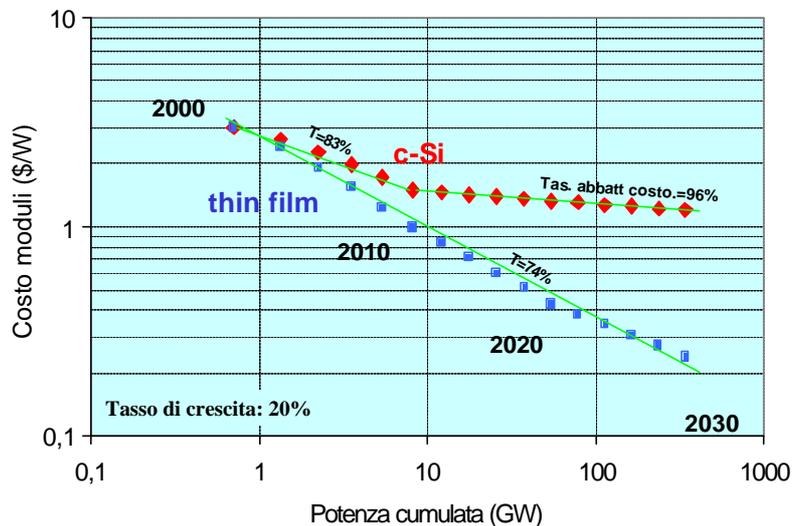
**La curva di apprendimento**

All'aumento del mercato del fotovoltaico è corrisposta una significativa diminuzione dei costi. In particolare si è notato negli ultimi 20 anni che ad ogni raddoppio della potenza installata nel mondo si è registrata una diminuzione del costo del modulo pari al 18% (tasso di abbattimento dell'82%).

Secondo questo trend, raggiunta una potenza

cumulata pari a circa 100 GW, si arriverebbe ad un costo di 1 \$/W, che avvicinerrebbe di molto il costo dell'energia elettrica prodotta dal fotovoltaico a quello dell'energia prodotta con metodi convenzionali. Più in dettaglio, per il silicio cristallino è previsto un valore del tasso di abbattimento dei costi pari a circa 83 % per i prossimi 10 anni. Dopo il 2010 tale tasso si attesterà intorno al 96%: ciò è legato essenzialmente al costo della

**LEARNING CURVE MODULI**



materia prima (il silicio di grado elettronico) ed al suo “shortage”. Tale tecnologia sembra quindi destinata a “saturarsi” fra circa un decennio.

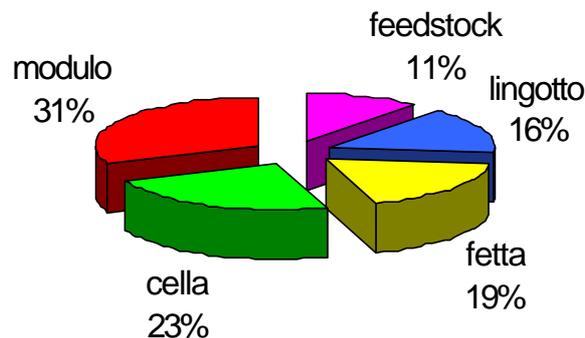
Per i film sottili, tecnologia oggi agli albori dello sviluppo, la situazione è però del tutto diversa e molto più promettente: il valore di T, pari a 74%, pur essendo del tutto ragionevole in quanto tipico delle tecnologie da sviluppare, è tale da promettere, già a circa 10 GW di potenza cumulata (fra una decina di anni) costi di modulo di 1 \$/W, e, a potenza cumulata di 100 GW (fra poco più di venti anni), costi inferiori di un ordine di grandezza rispetto agli attuali.

### La ripartizione dei costi

L’approvvigionamento del materiale di base per la realizzazione delle celle (scarti dell’industria elettronica) incide per l’11% sul costo dei moduli fotovoltaici al silicio policristallino. Un ulteriore 16% è

rappresentato dal costo per la fusione degli scarti e la preparazione del lingotto. Il taglio delle fette e la realizzazione delle celle incidono rispettivamente per il 19% e il 23% sul costo dell’intero modulo. Infine, la realizzazione del modulo, partendo dalle celle richiede il restante 31%.

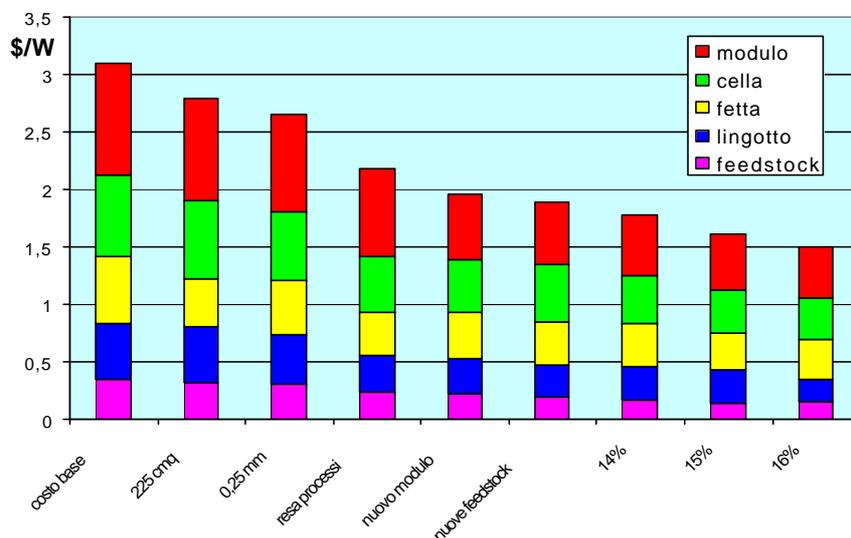
### RIPARTIZIONE COSTI MODULO POLICRISTALLINO



### La riduzione del costo

E’ possibile, ottimizzando le varie fasi realizzative, ridurre sensibilmente il costo dei moduli fotovoltaici. In particolare il costo del materiale di base potrebbe essere ridotto ricorrendo ad una produzione di feedstock specifica per il fotovoltaico (es. silicio di grado solare). Una ulteriore riduzione dei costi passa inoltre attraverso l’impiego di fette di grande superficie, piccolo spessore e maggiore efficienza. Infine, una significativa riduzione dei costi può essere

### RIDUZIONE DEL COSTO DEI MODULI



ricorrendo ad una produzione di feedstock specifica per il fotovoltaico (es. silicio di grado solare). Una ulteriore riduzione dei costi passa inoltre attraverso l’impiego di fette di grande superficie, piccolo spessore e maggiore efficienza. Infine, una significativa riduzione dei costi può essere

ottenuta ottimizzando i processi per la preparazione delle celle (al fine di aumentarne la resa) e ricorrendo a tecniche di impannellamento innovative.

### **Conclusioni**

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.

## GLI IMPIANTI

### L'impianto fotovoltaico

Gli impianti fotovoltaici sono sistemi in grado di captare e trasformare l'energia solare in energia elettrica. Fondamentalmente 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 (o da un

campo fotovoltaico nel caso di impianti di una certa consistenza), 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.

## I COMPONENTI DEGLI IMPIANTI

- **Generatore fotovoltaico**
  - **Insieme di moduli fotovoltaici**
    - **Potenza: n° totale di moduli**
    - **Tensione: n° moduli in serie**
  - **Struttura meccanica**
    - **Sostenere, ancorare e orientare i moduli**
- **Sistema di condizionamento della potenza**
  - **Impianti isolati**
    - **Adatta le caratteristiche del generatore PV all'utenza**
    - **Gestisce l'accumulo (continuità dell'alimentazione in assenza di sole)**
  - **Impianti collegati alla rete**
    - **Converte la corrente continua in alternata**
    - **Adatta il generatore PV alla rete (MPPT)**
    - **Controlla la qualità della potenza immessa in rete (distorzione e rifasamento)**

### 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<sup>2</sup> e temperatura dei moduli di 25°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

- Sono utilizzati dove:
  - Non è disponibile la rete elettrica
  - È onerosa la gestione e la manutenzione
  - È richiesto un basso impatto ambientale
  - Siti di difficile accesso
  - Richiesta
    - Alta affidabilità
    - Semplicità di gestione
    - Erogazione intermittente
    - Trasportabilità
    - Riduzione consumi carburante

### 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

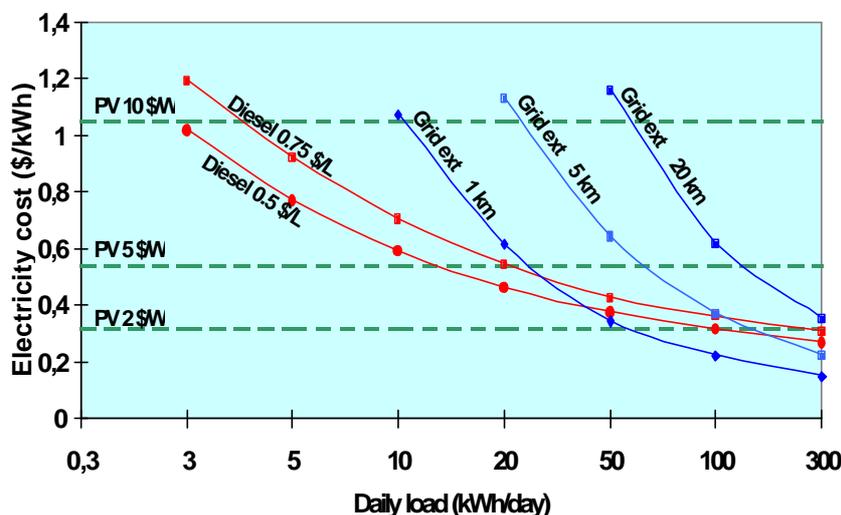
legati alla realizzazione di linee di distribuzione in zone a bassa densità abitativa e bassi consumi, oltre che del negativo impatto sul paesaggio. Anche nei casi in cui non esistono

impedimenti di ordine economico

all'approvvigionamento di elettricità tramite gruppi elettrogeni, bisogna considerarne, a fronte dei costi d'investimento

indubbiamente più bassi, gli inconvenienti legati

## CONFRONTO TRA PV- DIESEL - COLLEGAMENTO ALLA RETE



all'approvvigionamento del combustibile, alla rumorosità, all'inquinamento indotto e ai non trascurabili costi di manutenzione.

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

## GLI IMPIANTI ISOLATI

### • Applicazioni

• <b>Elettrificazione rurale</b>	<b>0,1 – 1,5 kW</b>
• <b>Illuminazione aree isolate</b>	<b>0,1 – 10 kW</b>
• <b>Segnalazione e rilevamento dati</b>	<b>0,1 – 1 kW</b>
• <b>Assistenza alla navigazione</b>	<b>0,5 – 5 kW</b>
• <b>Telecomunicazioni</b>	<b>0,5 – 10 kW</b>
• <b>Protezione catodica</b>	<b>0,5 – 5 kW</b>
• <b>Dissalazione acqua</b>	<b>10 – 100 kW</b>
• <b>Pompaggio acqua</b>	<b>0,5 – 5 kW</b>
• <b>Refrigerazione</b>	<b>0,5 – 5 kW</b>
• <b>Condizionamento</b>	<b>0,5 – 5 kW</b>

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 (PVS): 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

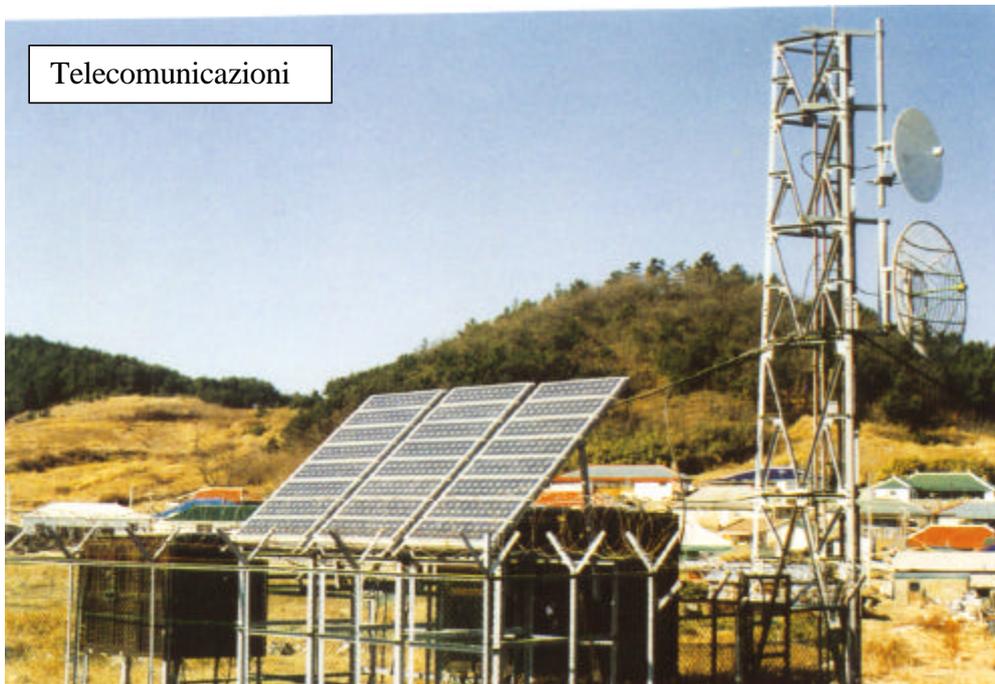
modo autonomo dalle popolazioni locali e può essere applicato in modo capillare, senza dover costruire grandi reti di distribuzione, risultando quindi economico e compatibile con eco-ambienti ancora non contaminati da attività industriali.

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 refrigeratori, molto utili soprattutto nei paesi in via di sviluppo per la conservazione di vaccini e sangue;
- 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

### IMPIANTI COLLEGATI ALLA RETE

- Sono utilizzati dove la produzione di energia elettrica da fonte convenzionale è:
  - Costosa
  - Elevato impatto ambientale
- Applicazioni
 

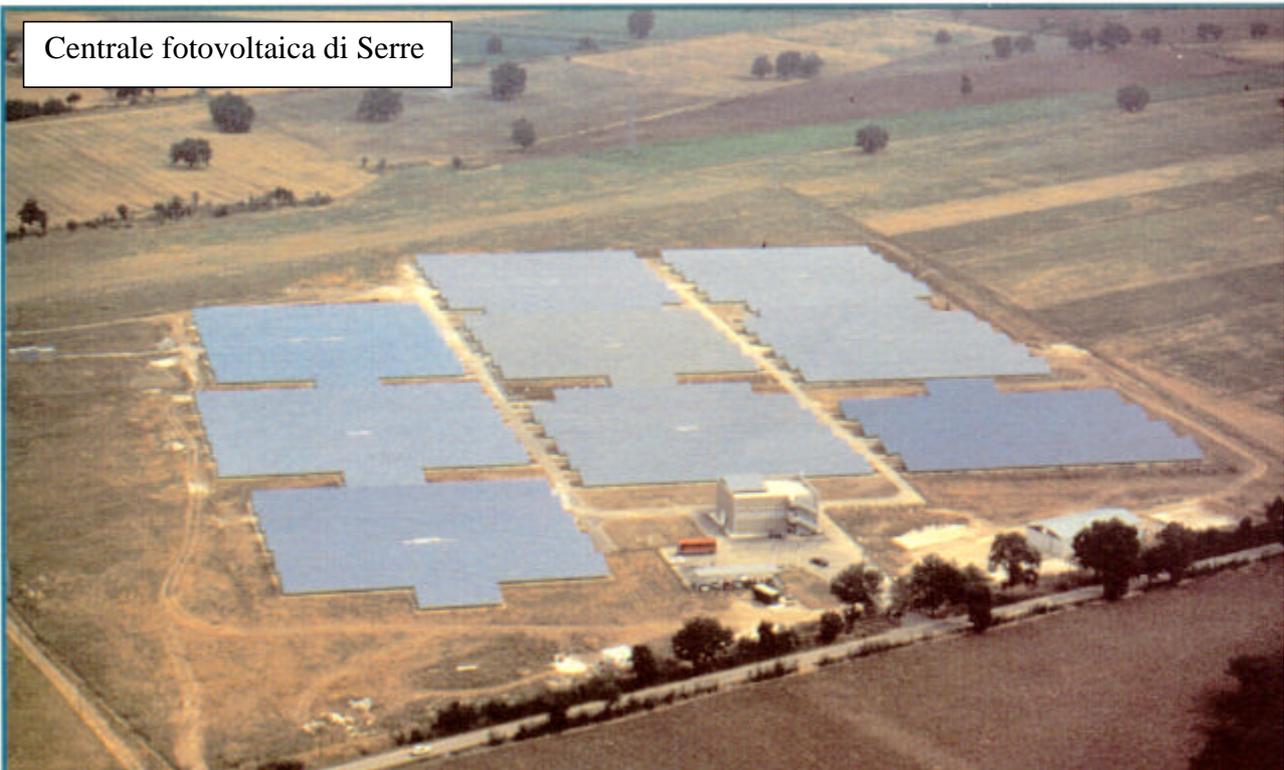
– Generazione diffusa	1 – 50 kW
– Supporto alla rete di distribuzione	0,5 – 1 MW
– Centrali di produzione	> 1 MW
– Support a piccole reti (isole)	100 – 500 kW

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.

Una applicazione alquanto recente in questo settore è quella relativa ai sistemi fotovoltaici

integrati negli edifici.

Centrale fotovoltaica di Serre

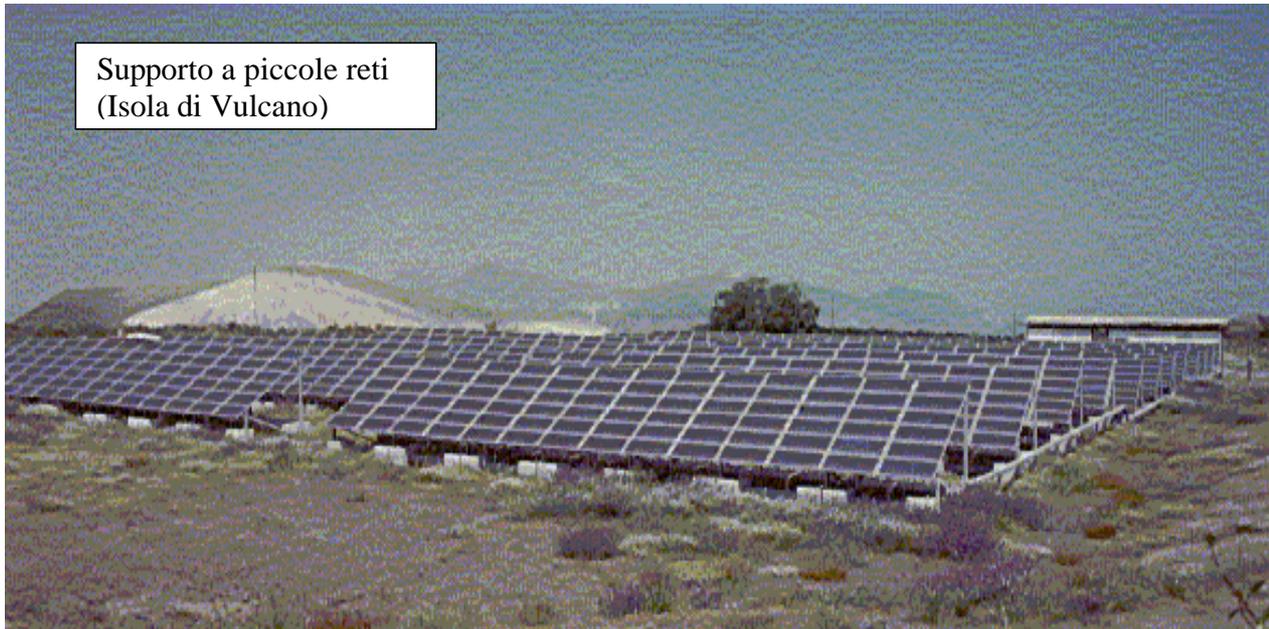


Questo tipo di utilizzazione, in rapido sviluppo, richiede l'impegno non solo dell'industria fotovoltaica e delle capacità progettuali di architetti ed ingegneri che ne rendano possibile l'integrazione tecnica, estetica ed economica nelle strutture edilizie, ma soprattutto degli organi politici preposti 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 e al momento la più grande 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.



### **Le caratteristiche degli impianti fotovoltaici**

I sistemi fotovoltaici:

- 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 PVS,

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 milioni di lire al km)

## GLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

### • **Caratteristiche generali**

- **Uso di una fonte inesauribile**
- **Completa modularità**
- **Elevata affidabilità**
- **Funzionamento automatico**
- **Manutenzione limitata**
- **Possibilità di utilizzare superfici marginali o altrimenti inutilizzabili**

### **L'impatto ambientale**

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 25 anni la vita utile di un impianto (ma probabilmente "durerà" anche 30 o 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  $1.300 \times (25 - 5) = 26.000$  kWh per ogni kW installato.

## L'IMPATTO AMBIENTALE

- **Inquinamento trascurabile**
  - **Chimico: totale assenza di emissioni (CO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>)**
  - **Termico: temperature massime in gioco 60°C**
  - **Acustico: assenza totale di rumore**
- **Completa assenza di parti in movimento**
- **Completa assenza di residui o scorie**

## IL RISPARMIO DI COMBUSTIBILE

- |                                      |                      |
|--------------------------------------|----------------------|
| • <b>Vita media dell'impianto</b>    | <b>25 anni</b>       |
| • <b>Energy pay back time</b>        | <b>5 anni</b>        |
| • <b>Energia annua prodotta</b>      | <b>1.300 kWh/kW</b>  |
| • <b>Energia prodotta in 20 anni</b> | <b>26.000 kWh/kW</b> |
| • <b>1 kg di combustibile:</b>       | <b>4 kWh</b>         |
| • <b>Risparmio di combustibile</b>   | <b>6.500 kg/kW</b>   |
| • <b>CO<sub>2</sub>/kWh</b>          | <b>0,8 kg</b>        |
| • <b>Emissioni evitate</b>           | <b>21.000 kg/kW</b>  |

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"  $26.000 \times 0,25 = 6.500$  kg di combustibili fossili.

### 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 due 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 (200 milioni di MWh) sarebbe necessario un impegno di territorio pari a 3.000 km<sup>2</sup>. Tale impegno di territorio, sebbene enorme, costituisce solo un settimo dei terreni marginali in Italia (20.000 km<sup>2</sup>). 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.

## L' IMPATTO SUL TERRITORIO

- **Occupazione del suolo**
  - **Potenza impianto** **1 MW**
  - **Energia annua prodotta** **1.300 MWh**
  - **Utenze domestiche alimentate** **600**
  - **Area impegnata** **2 ettari**
- **Energia elettrica consumata in Italia 200 milioni di MWh (area necessaria 3.000 km<sup>2</sup>)**
- **Terreni marginali in Italia 20.000 km<sup>2</sup>**
- **Assenza di opere fisse**
- **Integrabilità in strutture 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 risega), le facciate (verticali, inclinate, a risega) 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.

## IL FOTOVOLTAICO E L'ARCHITETTURA

- **Tipologie integrate nelle strutture architettoniche**
  - Coperture (piane, inclinate, curve, a risega)
  - Facciate (verticali inclinate a risega orizzontale e verticale)
  - Frangisole (fissi, mobili)
  - Lucernai isolati a filare singolo o multiplo)
  - Elementi di rivestimento
  - Balaustre
- **Tipologie integrate nelle infrastrutture urbane**
  - Pensiline (auto, attesa)
  - Grandi coperture e tettoie
  - Tabelloni (informativi, pubblicitari)
  - Barriere antirumore





Facciata



Copertura piana

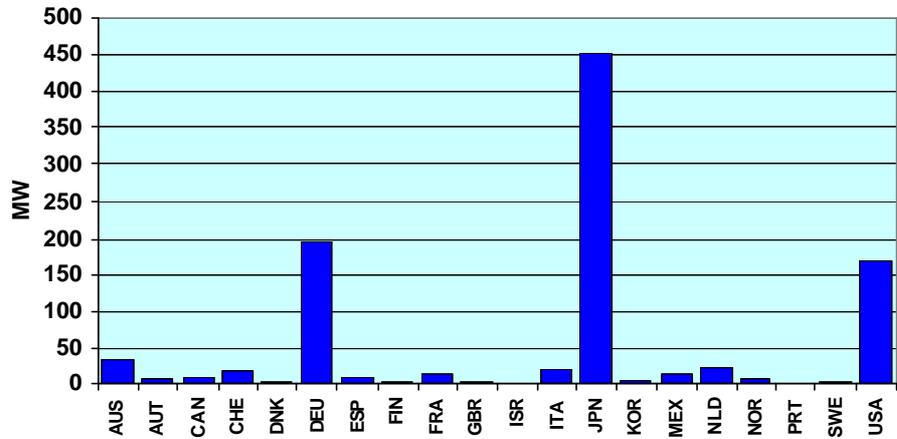


Copertura curva

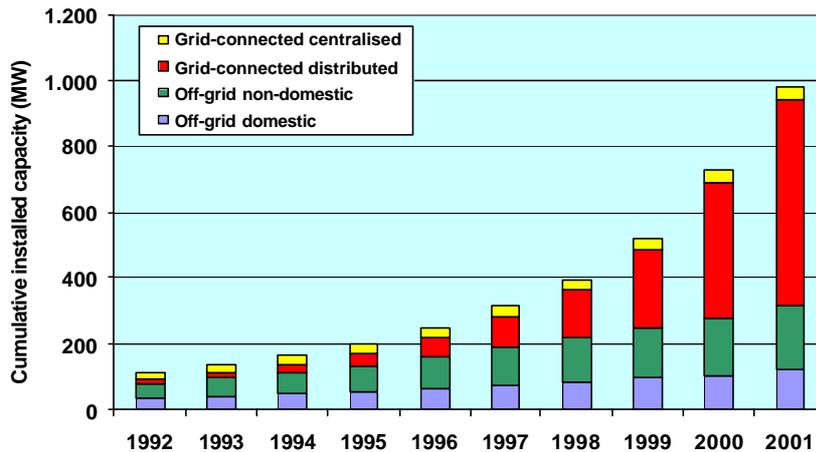
### La potenza installata nel mondo

Nel contesto internazionale l'Italia (20 MW) si colloca, per potenza installata, al quinto posto dopo il Giappone (450 MW), gli Stati Uniti (170 MW), la Germania (200 MW) e l'Australia (30 MW). In totale la potenza installata al livello mondiale ammonta, alla fine del 2001, a oltre 1000 MW.

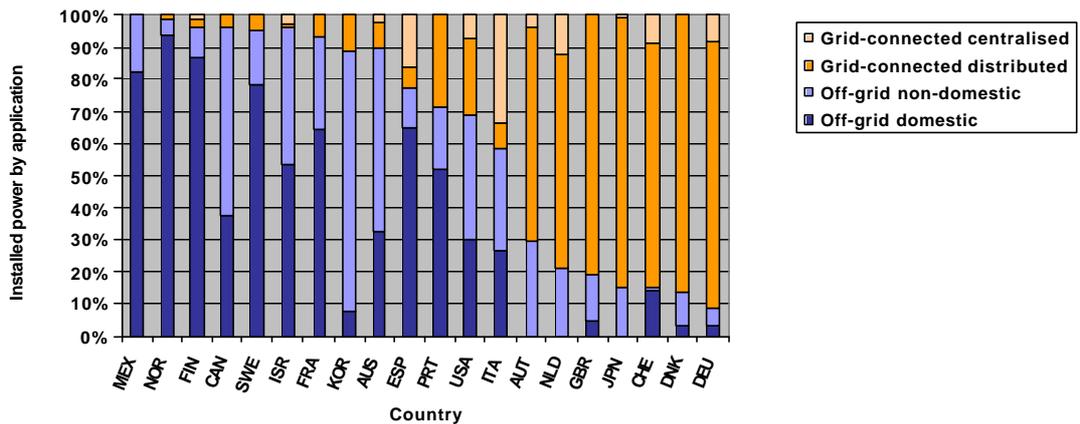
### POTENZA INSTALLATA



### POTENZA INSTALLATA



### POTENZA INSTALLATA PER APPLICAZIONE

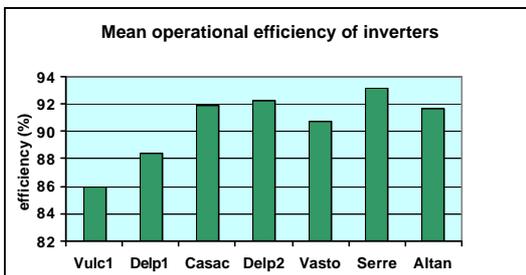
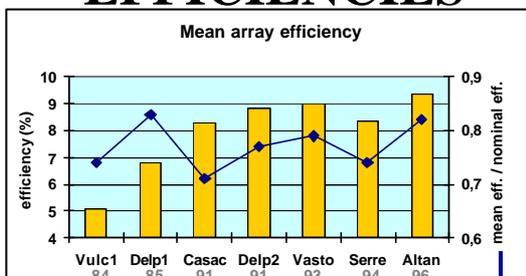


## Data base impianti fotovoltaici

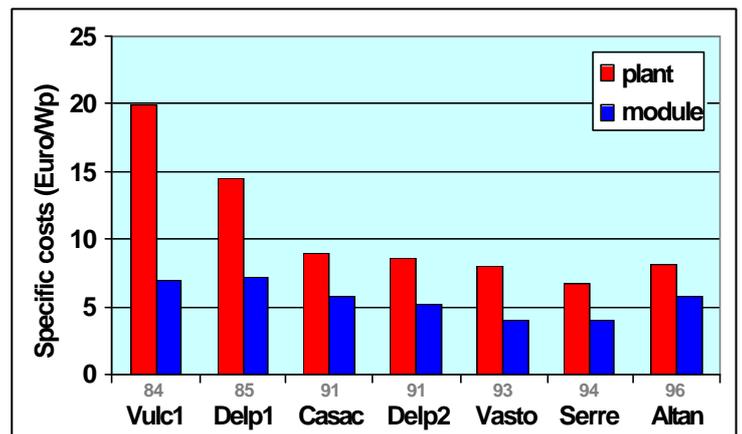
## DATABASE IMPIANTI PV

- Contiene i dati di progetto e di esercizio di 300 impianti PV localizzati in tutto il mondo (s.a e g.c.)
- Consente l'elaborazione dei dati memorizzati e il confronto fra i vari impianti
- Può essere scaricato gratuitamente (45 MB) dal sito [www.task2.org](http://www.task2.org) (è richiesta la registrazione)
- E disponibile su CD-Rom (20 Euro) contattando: [r.dahl@fz-juelich.de](mailto:r.dahl@fz-juelich.de)

## ARRAY AND INVERTER EFFICIENCIES



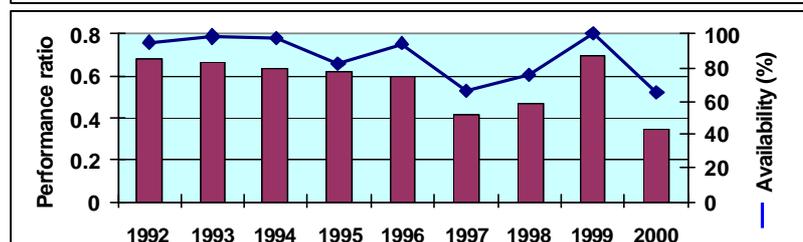
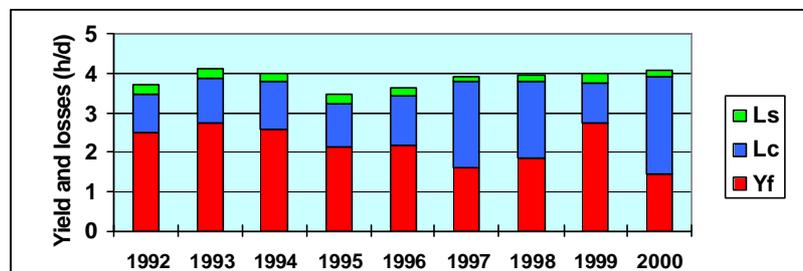
## COSTS



Costs not adjusted to the current year

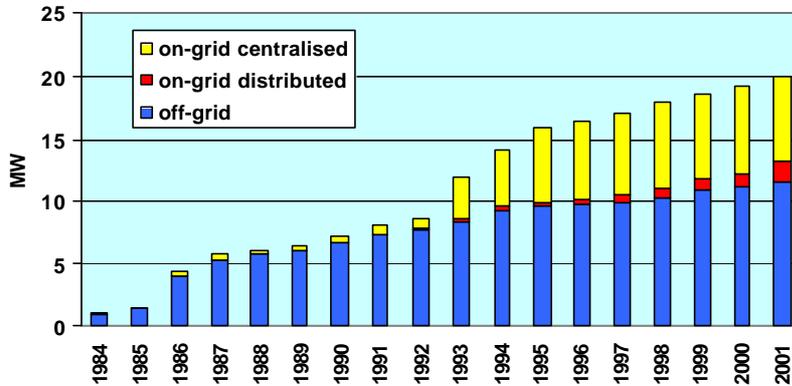
## CASACCIA PLUG

## INDICES OF PERFORMANCE



## La potenza installata in Italia

### POTENZA CUMULATA IN ITALIA



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 6,3 MW e delle applicazioni dimostrative

con oltre 6,7 MW.

Le applicazioni di piccoli impianti connessi alla rete ammontano invece ad alcune centinaia di kW. In totale, attualmente risultano installati impianti per circa 20 MW.

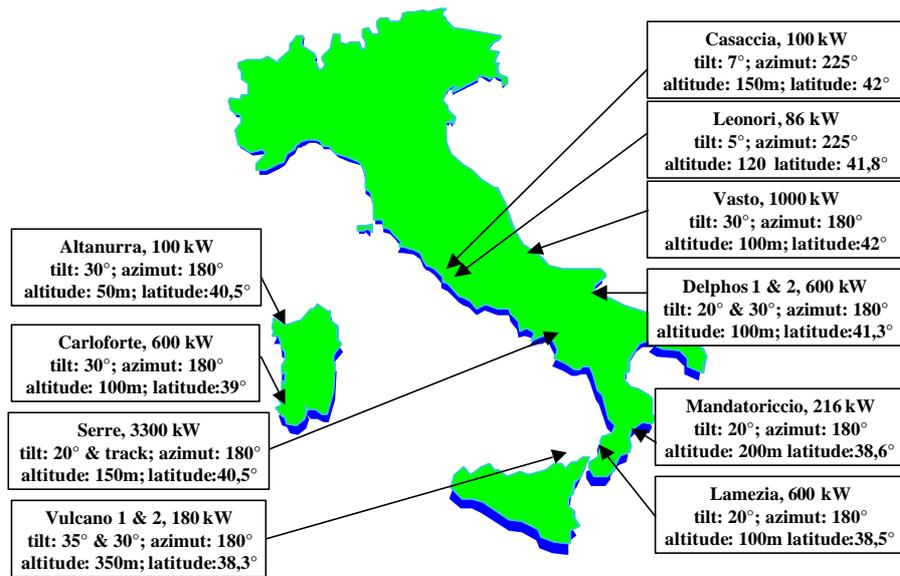
### LE APPLICAZIONI IN ITALIA

- **Residenziale:** **5,3 MW**
  - Elettrificazione rurale
  - Illuminazione
- **Industriale:** **6,3 MW**
  - Telecomunicazioni
  - Segnalazione
  - Dissalazione
  - Protezione catodica
- **Dimostrazione:** **6,7 MW**
- **Generazione diffusa:** **1,7 MW**
- **TOTALE** **20 MW**

### PRINCIPALI IMPIANTI DIMOSTRATIVI

<i>Plant</i>	<i>Power (kW)</i>	<i>Operator</i>	<i>In operation since</i>
Vulcano_1	80	ENEL (ERGA)	1985
Delphos_1	300	ENEA	1986
Casaccia	100	ENEA	1991
Delphos_2	300	ENEA	1992
Vasto	1000	Industrial Consortium	1993
Serre	3000	ENEL (ERGA)	1995
Leonori	86	Private	1995
Carloforte	600	Industrial Consortium	1995
Lamezia	600	Municipality	1996
Alta Nurra	100	ENEA	1997
Mandatoriccio	216	Municipality	1997
Serre tracking	330	ENEL (ERGA)	1998
Vulcano_2	100	ENEL (ERGA)	1999
<b>TOTAL</b>	<b>6800</b>		

## LA LOCALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI



Impianto Delphos



Impianto Casaccia



## La generazione diffusa

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;

## LA GENERAZIONE DIFFUSA

<i>Plant</i>	<i>Nomina power (kW)</i>	<i>Application</i>	<i>In operation</i>	<i>Final yield</i>	<i>Performance</i>
			<i>since</i>	<i>(h/day)</i>	<i>Ratio</i>
Forte Carpenedo - Venice	3.3	Roof integration	May 1999	1.99	0.76
ENEL Research Center- Milan	2.6	Façade	May 1999	1.45	0.81
Somaglia Autogrill - Milan	3.0	Roof integration	May 1999	2.36	0.81
Bovisa station - Milan	3.2	Horizontal roof installation	May 1999	2.29	0.81
S. Gilla shopping center - CA	3.1	Glass roof integration	Jul 1999	3.27	0.80
Professional school - Trento	2.3	Façade	Oct 2000	1.76	0.77
Province of Bolzano	3.1	Roof intallation	Oct 2000	3.18	0.62
Bologna University	1.8	Horizontal roof installation	Sep 2000	3.57	0.82
Bologna Municipality	2.3	Roof integration	Sep 2000	2.59	0.70
Turin University	1.5	Horizontal roof installation	Oct 2000	3.04	0.77
Turin Municipality	3.1	Glass roof integration	Dec 2001	-	-
Rome Sapienza University	1.8	Facade	Feb 2001	1.93	0.65
Rome Third University	2.5	Glass roof integration	Feb 2001	n.a.	n.a.
Naples Municipality	2.1	Sunshade	Oct 2000	3.13	0.68
Naples University	2.1	Railing integration	Oct 2000	2.28	0.68
Potenza University	2.0	Horizontal roof installation	Dec 2000	3.74	0.79
Palermo Municipality	2.1	Glass roof integration	Dec 2001	-	-
Palermo University	2.9	Glass roof integration	Dec 2001	-	-



Trento – Centro Professionale



Roma – Università  
La Sapienza



Lodi - Autogrill



## LA PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI

### La progettazione di un impianto fotovoltaico

La progettazione di un impianto fotovoltaici consiste nella ricerca della condizione di migliore adattamento fra l'energia solare disponibile, e l'energia richiesta dall'utenza cui l'impianto è destinato. Le principali fasi del progetto riguardano:

- il calcolo dell'energia raccolta dal generatore fotovoltaico;
- l'identificazione dell'utenza e il calcolo dell'energia richiesta;
- l'individuazione della configurazione dell'impianto;
- il calcolo del bilancio energetico dell'impianto per differenti taglie dei componenti e diverse esposizioni dei moduli fotovoltaici
- l'individuazione della soluzione ottimale in termini di massima economicità, efficienza, affidabilità.

### L'energia raccolta dai moduli fotovoltaici

#### ENERGIA PRODOTTA DAI MODULI PV

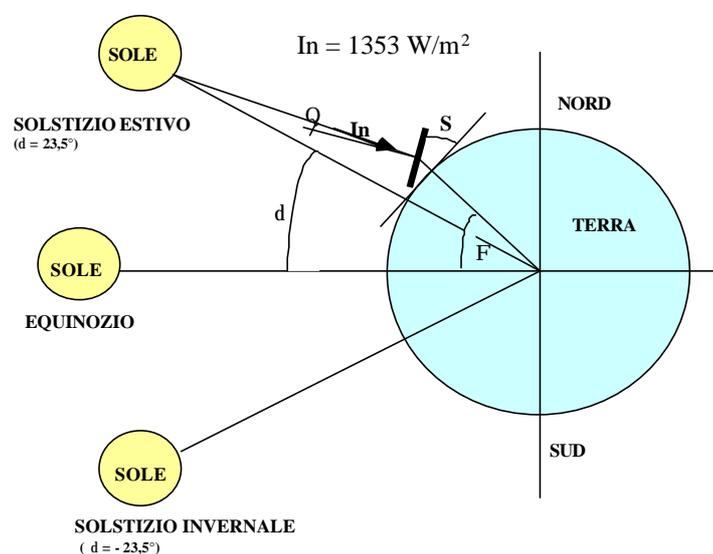
- Dipende da:
  - **Radianza (giorno, ora, condizioni meteorologiche)**
  - **Caratteristiche elettriche dei moduli ( $P_{nom}$ )**
  - **Sito (latitudine)**
  - **Esposizione moduli (angolo di tilt e di azimut)**
  - Configurazione del generatore fotovoltaico
  - Temperatura
  - Riflettanza del terreno
- Come si ottiene:
  - Calcolando l'irraggiamento sul piano dei moduli (dai dati storici)
  - L'accuratezza dipende dalle fluttuazioni dei dati climatici rispetto ai dati storici

Dipende dalla latitudine del sito, dall'esposizione dei moduli (angolo di tilt e di azimut) e dall'irraggiamento. Quest'ultimo dipende dalla stagione, dall'ora del giorno e dalle condizioni meteorologiche. Inoltre, la quantità di energia raccolta dal generatore fotovoltaico dipende dalla temperatura dei moduli, dalla configurazione del campo, dalle caratteristiche elettriche e ottiche dei moduli fotovoltaici e, infine, dalla riflettanza del terreno.

### La radiazione solare

L'energia irradiata dal Sole si propaga con simmetria sferica nello spazio, raggiungendo la fascia esterna dell'atmosfera terrestre con un valore d'energia, per unità di superficie e di tempo, pari a  $1353 \text{ W/m}^2$  (costante solare). L'energia incidente sulla superficie dei moduli fotovoltaici dipende dalla costante

### LA RADIAZIONE SOLARE



solare e dall'angolo che formano i raggi del sole con la superficie dei moduli. Tale angolo, funzione oltre che della posizione del pannello anche dal tempo, può essere determinato analiticamente. Pertanto, fuori dall'atmosfera, è possibile calcolare, istante per istante, il valore dell'irraggiamento sui moduli e l'insolazione, cioè l'energia incidente

## LA RADIAZIONE SOLARE FUORI DELL'ATMOSFERA

$$I = I_n \cos Q$$

- **$I_n = 1353 \text{ W/m}^2$  (intensità della radiazione su superficie piana perpendicolare ai raggi del sole)**
- **$Q = f(F, S, g, w, d)$  (angolo tra la normale alla superficie e i raggi del sole)**
  - $\Phi$  latitudine
  - $S$  angolo di tilt
  - $\gamma$  azimut
  - $\omega$  angolo orario =  $15 (12 - t)$
  - $t$  ora solare
  - $\delta$  declinazione solare =  $23.5 \sin [360 (284 + N) / 365]$
  - $N$  giorno dell'anno

## L'INSOLAZIONE GIORNALIERA

$$Q = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I dt = I_n \int_{-\omega_0}^{\omega_0} f(F, S, g, d)$$

$\omega_0 =$  **angolo orario per cui  $I = 0$  (è il minore tra l'angolo del tramonto sul pannello o sulla località)**

ANGOLO OTTIMALE DI TILT = LATITUDINE

$$dQ/dS = 0$$

per  $g = 0$   
valore medio annuale di  $d$  è  $= 0$

sui moduli in un determinato periodo di tempo.

Inoltre, fuori dell'atmosfera il valore massimo dell'energia incidente sui moduli si ottiene per angolo di azimut nullo e angolo di tilt pari alla latitudine del sito.

**La radiazione solare al suolo**

Nell'attraversare

l'atmosfera terrestre, la radiazione solare subisce notevoli variazioni. In parte viene assorbita dall'atmosfera, in parte viene nuovamente riflessa nello spazio esterno e in parte viene parzialmente diffusa nell'atmosfera stessa. Per effetto dell'assorbimento e riflessione dell'atmosfera la radiazione solare diretta che arriva al suolo è

## LA RADIAZIONE SOLARE AL SUOLO

- Effetto dell'atmosfera
  - Assorbimento e diffusione (spessore e composizione dell'atmosfera)
- Effetto del suolo
  - Riflessione (caratteristiche del terreno)

$$I = I_{dir} + I_{diff} + I_{rif}$$

- Caratteristiche
  - Variabile dipendente dal clima
  - Prevedibile attraverso dati storici del sito o di siti con caratteristiche climatiche simili
- Dati storici disponibili
  - Irraggiamento su superficie orizzontale (medie mensili)
    - Mappe isoradiative (atlante europeo)
    - norme UNI 10349
    - <ftp://erg7118.casaccia.enea.it> (fonte ENEA)

sempre inferiore al valore della costante solare mentre per effetto della diffusione, una parte della radiazione solare appare distribuita su tutta la volta celeste. Queste interazioni sono funzione della massa d'aria attraversata dalla radiazione e dalla composizione dell'aria. Infine, un terzo modo per cui un pannello posto al suolo raccoglie la radiazione solare è attraverso la riflessione del terreno circostante il pannello. A livello del suolo, a causa dei fenomeni suddetti, la radiazione totale può

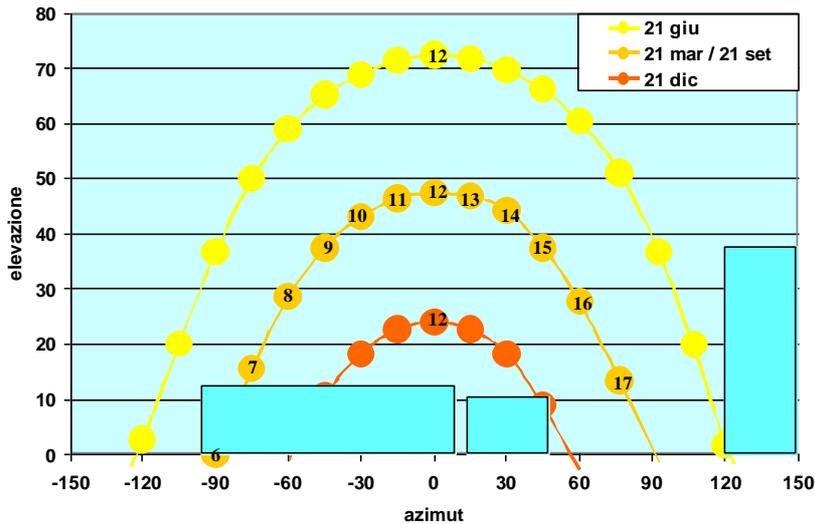
quindi essere assimilata alla somma di tre componenti: diretta, diffusa e riflessa.

Mediamente, in funzione dell'inclinazione del sole sull'orizzonte, la radiazione totale raggiunge un valore massimo pari a circa  $1.000 \text{ W/m}^2$  (irraggiamento al suolo, in condizioni di giornata serena e sole a mezzogiorno). Questo valore è tuttavia fortemente influenzato dalle variazioni delle condizioni atmosferiche che hanno andamento aleatorio. Per questo

motivo il progetto degli impianti fotovoltaici va eseguito utilizzando i dati storici di soleggiamento rilevati nella località prescelta o in località con caratteristiche climatiche simili.

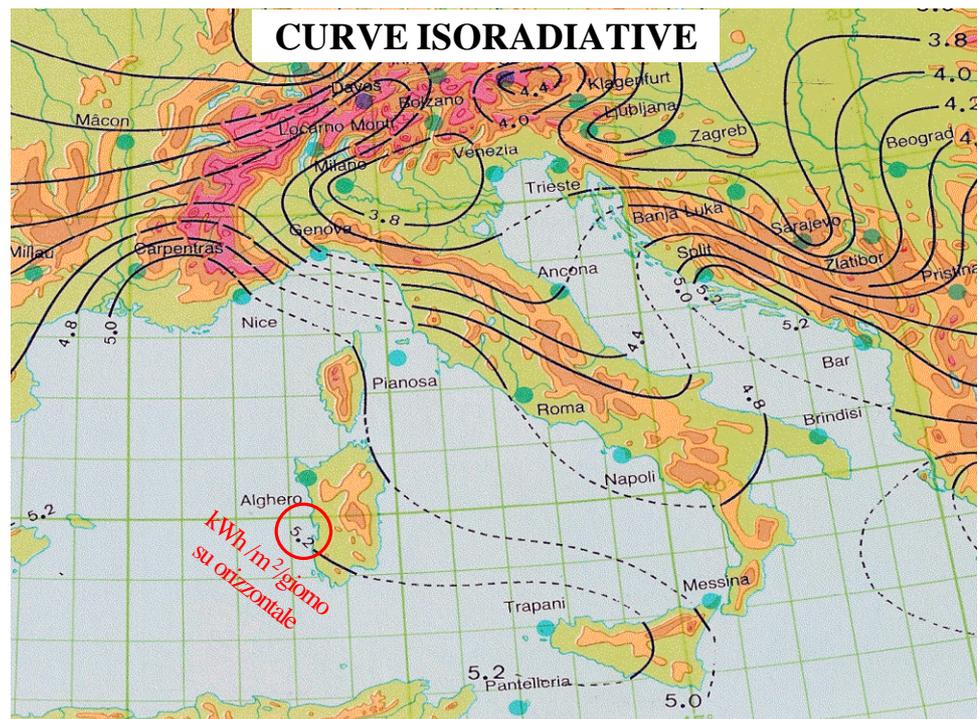
I dati storici disponibili riguardano generalmente i valori giornalieri o medi mensili dell'insolazione su superficie orizzontale (espressi in  $\text{kWh/m}^2/\text{giorno}$ ). Per alcuni siti sono disponibili anche i valori dell'insolazione su superficie inclinata.

## ORBITE SOLARI



### Le orbite solari

Permettono di determinare, per una assegnata località, la posizione del sole (elevazione e azimut) al variare delle stagioni e dell'ora del giorno. In particolare l'elevazione è l'angolo formato dai raggi del sole con la superficie orizzontale mentre l'azimut è l'angolo formato dai raggi del sole e la direzione del sud.



## Le curve isoradiative

Riportano i valori medi mensili dell'insolazione su superficie orizzontale e vengono costruite correlando i dati di soleggiamento rilevati dalle diverse stazioni meteorologiche. Queste mappe costituiscono una utile guida per determinare i valori di soleggiamento di località che non si trovino in prossimità di una stazione di rilevamento della radiazione.

## La radiazione su superficie inclinata

Per poter calcolare la radiazione su superficie inclinata, partendo da quella su superficie orizzontale (deducibile dai dati storici del sito), è necessario scomporre la radiazione globale nelle sue tre componenti (diretta, diffusa e riflessa). Il metodo generalmente seguito per la stima della componente diffusa della radiazione è basato sulla formula di Liu-

Jordan. La componente riflessa si ottiene per differenza della radiazione globale con quella diffusa,

essendo nulla, su superficie orizzontale la componente riflessa.

Per alcune località i valori della componente diretta e diffusa della radiazione su superficie orizzontale vengono direttamente forniti dalle norme UNI 10349

Nota la componente diretta e diffusa della radiazione solare su

superficie orizzontale è possibile determinare mediante formule geometriche i valori della componente diretta e diffusa su superficie inclinata. Inoltre note le proprietà riflettenti del terreno (riflettanza) è possibile determinare il valore della componente riflessa su superficie inclinata, detta componente di albedo. Numerosi sono i software in commercio che, sulla base dei dati storici

## DATI ENEA

(ftp://erg7118.casaccia.enea.it)

prov. comune	Radiazione giornaliera media mensile su superficie orizzontale (kWh/m <sup>2</sup> /giorno)											
	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
AL Acqui Terme	1.53	2.36	3.83	4.86	5.75	6.39	6.39	5.39	4.03	2.69	1.72	1.25
AL Alessandria	1.50	2.33	3.83	4.89	5.75	6.42	6.39	5.42	4.03	2.69	1.67	1.25
AL Casale Monferrato	1.47	2.33	3.81	4.86	5.69	6.36	6.36	5.39	4.00	2.69	1.67	1.25
AL Castelnuovo Scrivia	1.50	2.31	3.83	4.89	5.78	6.39	6.39	5.42	4.03	2.67	1.67	1.22
AL Novi Ligure	1.50	2.31	3.81	4.86	5.78	6.39	6.39	5.42	4.03	2.69	1.67	1.22
AL Ovada	1.53	2.33	3.81	4.86	5.75	6.42	6.39	5.42	4.03	2.69	1.69	1.25
AL Serravalle Scrivia	1.50	2.31	3.81	4.86	5.78	6.39	6.39	5.42	4.03	2.69	1.69	1.22
AL Tortona	1.50	2.31	3.81	4.86	5.78	6.39	6.39	5.42	4.03	2.67	1.67	1.22
AL Valenza	1.50	2.33	3.83	4.86	5.75	6.39	6.39	5.42	4.03	2.69	1.67	1.25
AT Asti	1.50	2.36	3.83	4.86	5.72	6.39	6.36	5.36	4.00	2.69	1.72	1.28
AT Canelli	1.53	2.39	3.83	4.86	5.75	6.39	6.36	5.39	4.00	2.69	1.72	1.28
AT Costigliole d'Asti	1.53	2.39	3.83	4.89	5.72	6.39	6.33	5.36	4.00	2.72	1.72	1.28
AT Nizza Monferrato	1.50	2.36	3.83	4.89	5.75	6.39	6.36	5.39	4.03	2.69	1.69	1.28
AT San Damiano d'Asti	1.50	2.39	3.83	4.86	5.69	6.36	6.33	5.33	4.00	2.72	1.75	1.28
BI Biella	1.28	2.11	3.58	4.64	5.44	6.14	6.14	5.19	3.83	2.67	1.61	1.17
BI Cossato	1.33	2.17	3.64	4.67	5.47	6.17	6.17	5.22	3.86	2.67	1.61	1.19
CN Alba	1.50	2.39	3.81	4.86	5.69	6.36	6.31	5.33	4.00	2.72	1.75	1.31
CN Barge	1.31	2.17	3.67	4.69	5.56	6.17	6.11	5.19	3.94	2.75	1.72	1.22
CN Borgo San Dalmazzo	1.47	2.33	3.78	4.78	5.64	6.22	6.17	5.22	4.00	2.81	1.83	1.31
CN Bra	1.50	2.36	3.81	4.83	5.67	6.31	6.25	5.28	4.00	2.75	1.78	1.31

kWh = MJ / 3,6

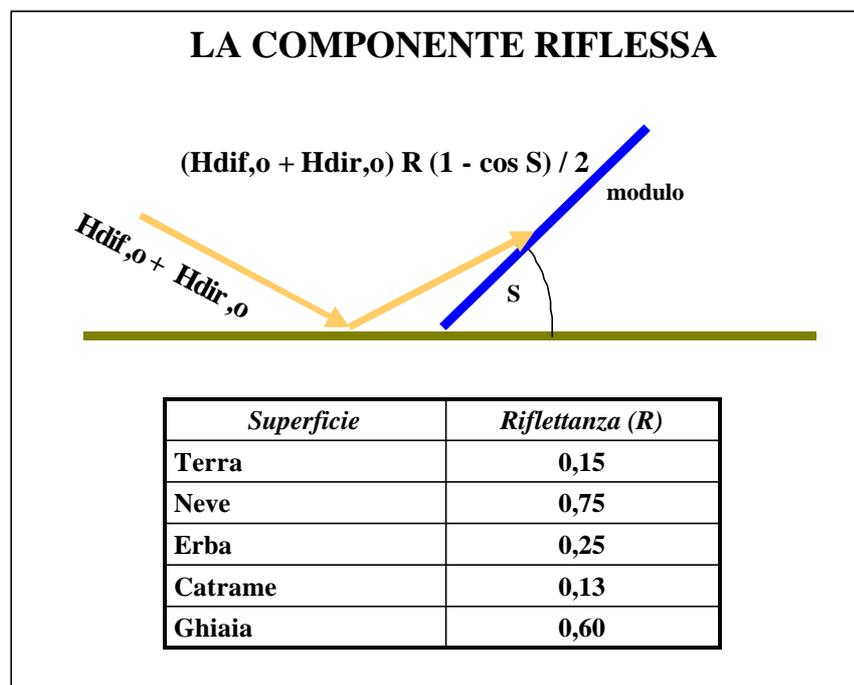
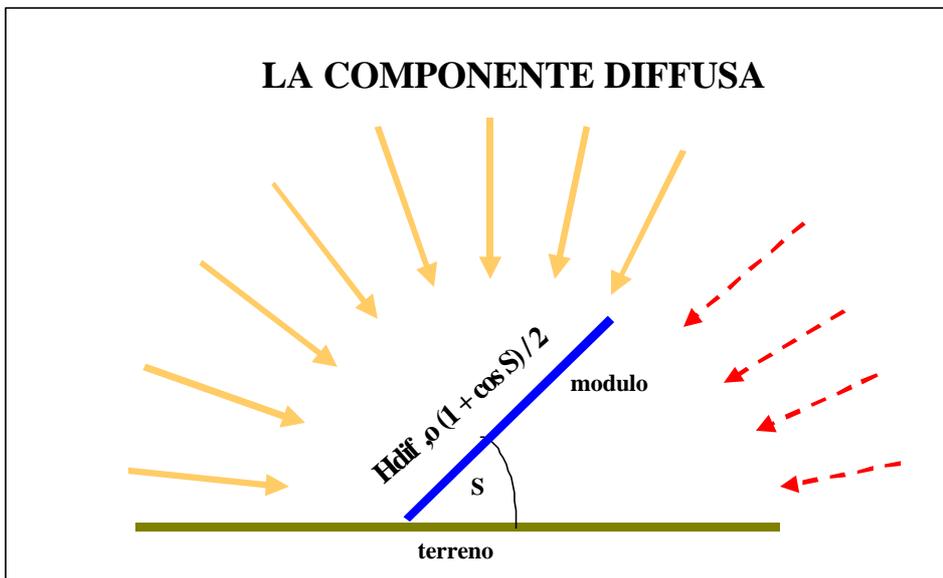
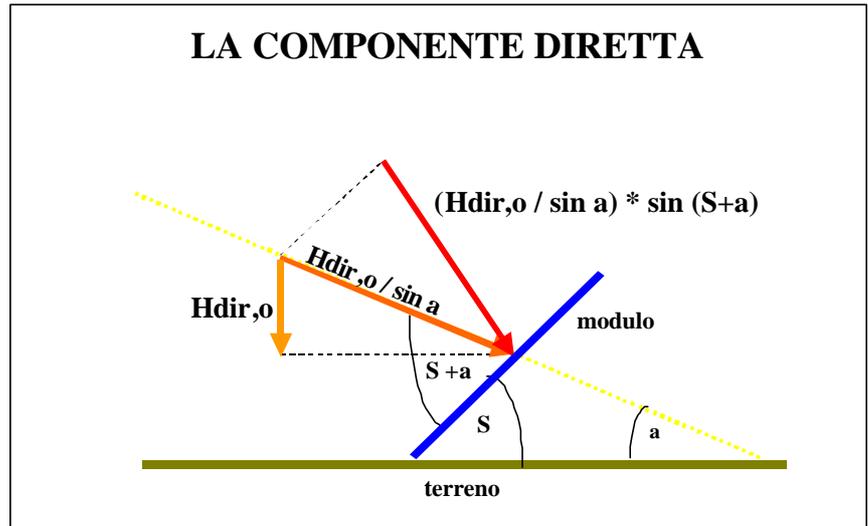
## LE COMPONENTI DELL'IRRAGGIAMENTO (metodo di Liu-Jordan)

- Componente diffusa dell'irraggiamento su superficie orizzontale  
 $H_{dif,o} = H_o (a + b H_o / Q_o)$ 
  - $H_o$  : irraggiamento su superficie orizzontale (dati storici)
  - $Q_o$  : irraggiamento su superficie orizzontale fuori dell'atmosfera
  - $a$  e  $b$  : coefficienti funzione del sito

	$a$	$b$
Londra	0,990	-1,103
Amburgo	1,040	-1,038
Valentia	0,958	-0,851
Roma	0,881	-0,972
Blue Hill USA	0,720	-0,670
Capetown	1,070	-1,260

- Componente diretta dell'irraggiamento su superficie orizzontale  
 $H_{di,o} = H_o - H_{dif,o}$

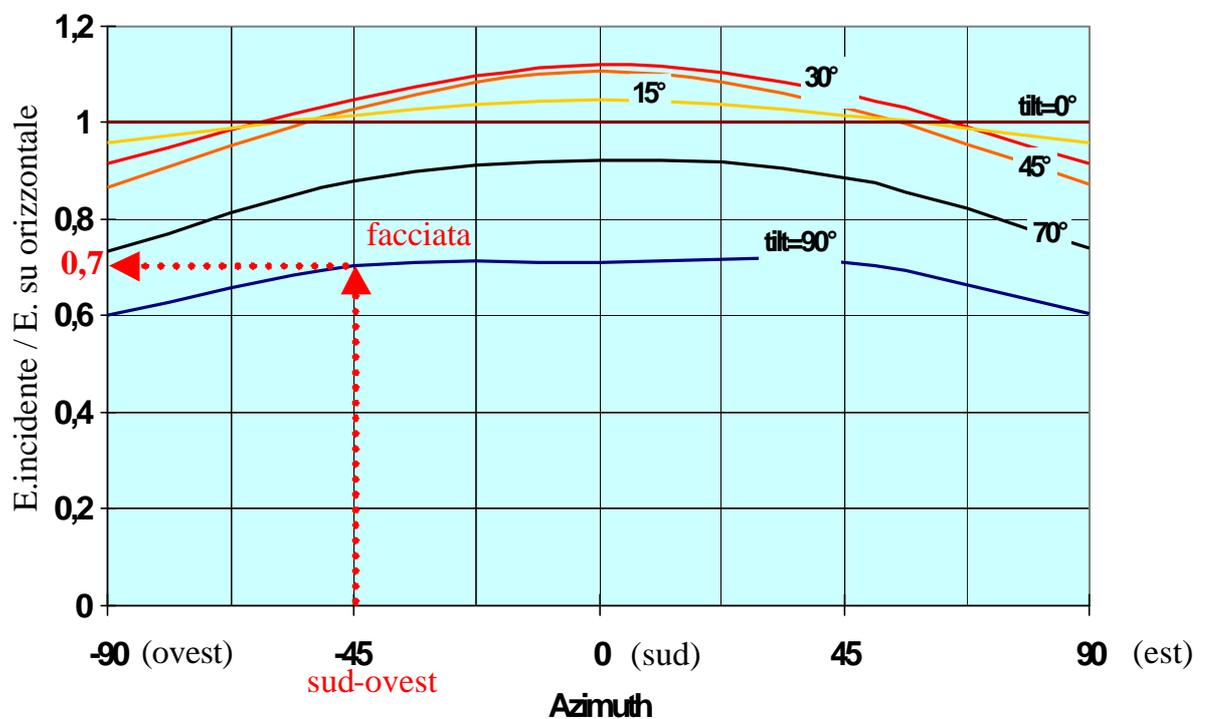
consentono il calcolo delle tre componenti della radiazione, una volta assegnata l'inclinazione dei moduli, la località e le caratteristiche del terreno.



## ENERGIA INCIDENTE SUI MODULI

- Norme UNI 8477
  - Calcolo dei valori medi mensili dell'energia raccolta da una superficie comunque esposta
  - Dati di input
    - Valori medi mensili dell'irraggiamento su superficie orizzontale
    - Latitudine, tilt, azimuth
    - Riflettanza del terreno
    - Frazione componente diffusa (coeff. a e b)

## ENERGIA INCIDENTE



**Listing del programma per il calcolo  
dell'energia raccolta da una superficie comunque esposta**

Sub A()

Dim Hh(12)

Rem dati di input

f1 = 44: f = 0.017453 \* f1: Rem -----latitudine

b1 = 25: b = 0.017453 \* b1: Rem -----tilt

g1 = 90: g = 0.017453 \* g1: Rem -----azimut

rifl = 0.2: Rem-----riflettanza terreno

aa = 0.881: Rem coefficiente a

bb = -0.972: Rem coefficiente b

Hh(1) = 1.5: Rem irraggiamento su orizzontale gennaio

Hh(2) = 2.3

Hh(3) = 3.6

Hh(4) = 4.7

Hh(5) = 5.8

Hh(6) = 6.4

Hh(7) = 6.7

Hh(8) = 6.1

Hh(9) = 4.6

Hh(10) = 3.2

Hh(11) = 1.9

Hh(12) = 1.4: Rem irraggiamento su orizzontale dicembre

Rem fine dati di input

l = l + 1

For i = 1 To 12

n = Int(i \* 365 / 12 - 15): Rem ----giorno centro mese

d = 0.017453 \* 23.45 \* Sin(0.017453 \* 360 \* (284 + n) / 365): Rem ----declinazione

o0 = Atn(Sqr(1 - Tan(d) \* Tan(d) \* Tan(f) \* Tan(f)) / (-Tan(d) \* Tan(f)))

If (o0 < 0) Then o0 = 180 \* 0.017453 + o0: Rem-----angolo orario tramonto astronomico

T = Sin(d) \* (Sin(f) \* Cos(b) - Cos(f) \* Sin(b) \* Cos(g))

U = Cos(d) \* (Cos(f) \* Cos(b) + Sin(f) \* Sin(b) \* Cos(g))

V = Cos(d) \* (Sin(b) \* Sin(g))

Th = Sin(d) \* Sin(f)

Uh = Cos(d) \* Cos(f)

Vh = 0

Hho = (24 \* 3.6 / 3.1415) \* 1.353 \* (1 + 0.033 \* Cos(360 \* n / 365)) \* (Th \* o0 + Uh \* Sin(o0)): Rem-----irraggiamento extraatmoferico orizzontale

Kt = (Hh(i) \* 3.6) / Hho: Rem indice di soleggiamento reale

HdHh = (aa + bb \* Kt): Rem-----frazione diffusa Hd/Hh

tgo2\_1 = (-V + Sqr(U \* U + V \* V - T \* T)) / (T - U)

tgo2\_2 = (-V - Sqr(U \* U + V \* V - T \* T)) / (T - U)

```

o1 = 2 * (Atn(tgo2_1))
o2 = 2 * (Atn(tgo2_2))
If V * Cos(o1) > U * Sin(o1) Then
w1 = o1
w2 = o2
Else
w1 = o2
w2 = o1
End If

If (w1 < (-o0)) Then
  If (w2 > o0) Then
    wp = -o0
    ws = o0
  Else
    wp = -o0
    ws = w1
  End If
Else
  If (w2 > o0) Then
    wp = w1
    ws = o0
  Else
    wp = w1
    ws = w2
  End If
End If

Hb = 1.353 * ((T * (ws - wp)) + (U * (Sin(ws) - Sin(wp))) - (V * (Cos(ws) - Cos(wp))))
Hbh = 2 * 1.353 * (Th * o0 + Uh * Sin(o0))
Rb = Hb / Hbh
R = (1 - HdHh) * Rb + (HdHh * (1 + Cos(b)) / 2) + rifl * ((1 - Cos(b)) / 2)
H = R * Kt * Hho / 3.6

Cells(i + 2, 2) = Hh(i)
Cells(i + 2, 3) = H

Next i

End Sub

```

### L'influenza dell'angolo di azimut

Se i pannelli fotovoltaici vengono orientati con un angolo di azimut diverso da zero, ovvero non sono rivolti verso il sud, si alterano le modalità con cui l'energia viene raccolta nell'arco del giorno e la quantità di energia raccolta su base annuale.

Quantitativamente, per superfici che si discostano dal sud di circa 45° si ha una diminuzione dell'energia raccolta di qualche percento mentre riduzioni pari al 20% si raggiungono per angoli di azimut intorno ai 90° (superfici esposte a est o a ovest).

Le ragioni per assegnare ai pannelli un angolo di azimut diverso da zero sono legate, soprattutto per impianti installati su edifici, a situazioni locali preesistenti (tetti, facciate).

## ENERGIA PRODOTTA DALL'IMPIANTO

$$E_p = E_i * S * h_{pv} * h_i =$$

$$E_i * P_{nom} * (1 - \text{perdite pv}) * h_i$$

- $P_{nom} = n^{\circ} \text{moduli} * P_{nom} \text{ modulo}$
- $\text{perdite pv} = 0,15$  (temperatura, vetro, resistive, mismatch)
- $h_i = 0,9 - 0,92$

$$E_p = E_i * P_{nom} * 0,75$$

### L'effetto della temperatura

La temperatura delle celle dipende dalla temperatura ambiente, dal valore dell'irraggiamento e dalla manifattura del pannello. Il parametro che caratterizza la manifattura del pannello e la NOCT (Nominal Operative Cell Temperature) e rappresenta la temperatura del modulo allorché la temperatura ambiente è 20°C e la radiazione incidente è pari a 800 W/m<sup>2</sup>. Valori tipici di NOCT si aggirano intorno ai 40 – 45 °C e dipendono essenzialmente dal tipo di

## L'EFFETTO DELLA TEMPERATURA

Valori tipici per celle al silicio cristallino

$$\Delta V = -3,7\% / 10 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta I = +0,6\% / 10 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta P = -4\% / 10 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$T_c = T_a + (NOCT - 20) * I / 800$$

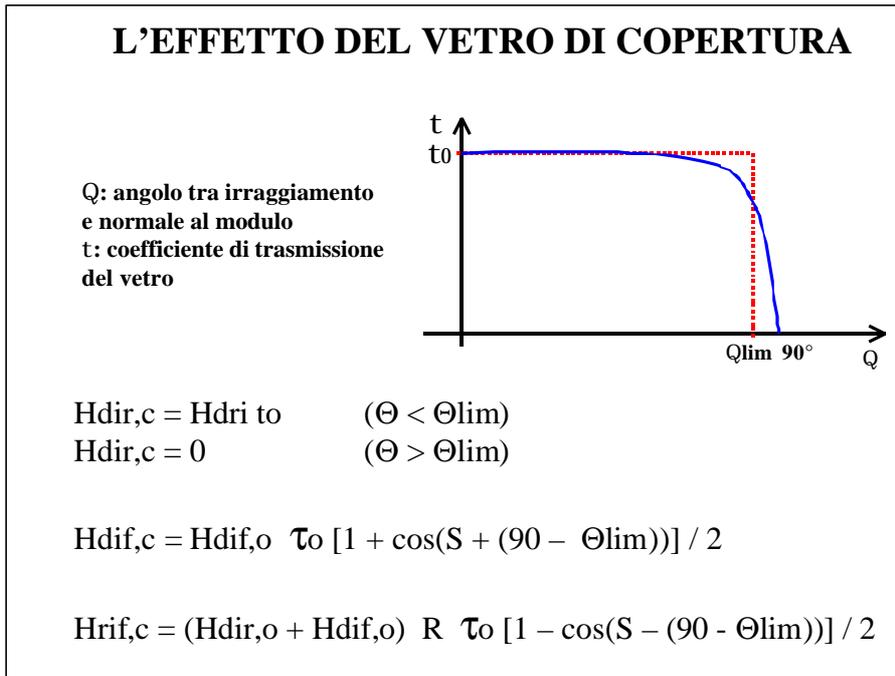
- $T_a$ : temperatura ambiente
- $I$ : irraggiamento
- NOCT: Nominal Operating Cell Temperature (a:  $I=800 \text{ W/m}^2$ ;  $T=20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ )
  - Valori tipici:
    - Vetro/vetro 41 °C
    - Vetro /plastica 46 °C

incapsulamento delle celle fotovoltaiche.

A parità di insolazione, all'aumentare della temperatura delle celle, si ha una diminuzione della tensione e della potenza erogata. In particolare, nel caso di moduli al silicio cristallino, per ogni 10°C di aumento di temperatura si ha una diminuzione della potenza erogata pari a circa il 5% e una diminuzione di tensione dell'ordine del 3%

### L'effetto del vetro di copertura

Il coefficiente di trasmissione del vetro antistante le celle è funzione dell'angolo di incidenza della radiazione rispetto alla superficie del modulo. In prima approssimazione il coefficiente di



trasmissione del vetro può essere considerato costante per angoli di incidenza maggiori di un angolo limite e nullo per angoli di incidenza minori del suddetto angolo limite. In questa ipotesi le varie componenti della radiazione vengono considerate nulle per angoli minori dell'angolo limite e attenuate di un fattore costante (pari al coefficiente di trasmissione del vetro) per angoli maggiori dell'angolo limite.

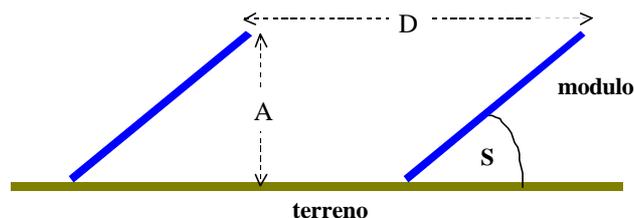
### La configurazione a file parallele

Quando, per motivi di spazio, non è possibile disporre i moduli fotovoltaici su un'unica fila si ricorre a più strutture separate poste in file parallele fra loro. La disposizione dei pannelli in file parallele consente piena libertà nella scelta dell'inclinazione dei moduli ma ha alcune controindicazioni:

- i pannelli non raccolgono la radiazione riflessa dal suolo (con l'esclusione della prima fila);

### LA CONFIGURAZIONE A FILE PARALLELE

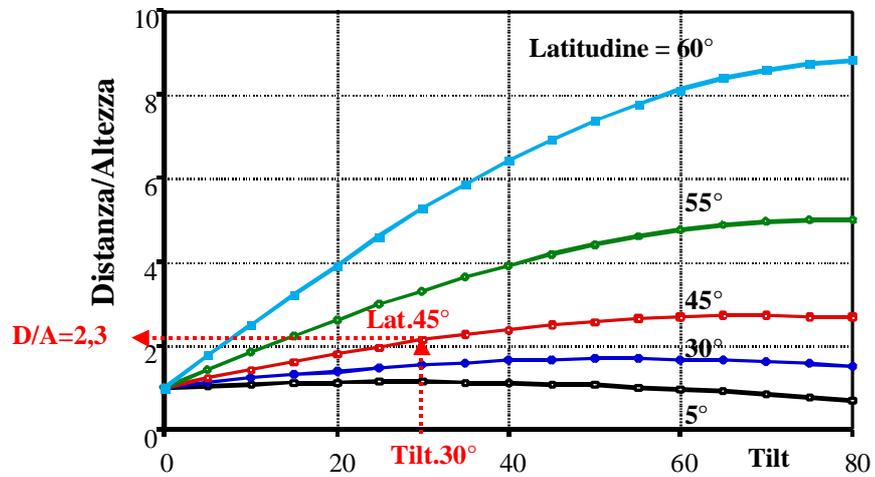
- Ove non è possibile disporre i moduli su una unica fila (motivi di spazio)



- Distanza tra le file: compromesso tra ombreggiamento e eccessiva distanza
- Assenza di ombre a mezzogiorno del solstizio invernale

- i pannelli raccolgono una parte ridotta della radiazione diffusa a causa del fatto che l'angolo di cielo visto da ciascun pannello è limitato dalla presenza delle altre file
- i pannelli possono ombreggiarsi a vicenda. Occorre pertanto distanziare le

## DISTANZA TRA FILE



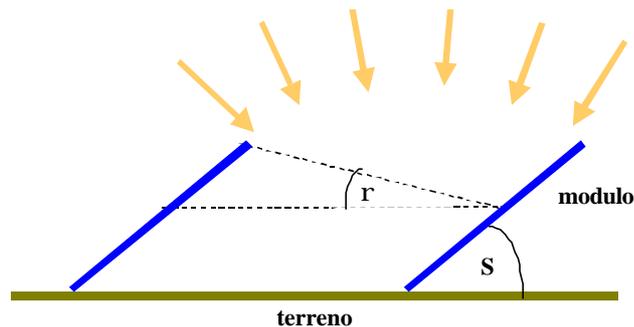
file in modo che non si ombreggino almeno durante le ore centrali della giornata, quando maggiore è il contributo all'energia che viene convertita.

## LE COMPONENTI DELLA RADIAZIONE NELLA CONFIGURAZIONE A FILE PARALLELE

$H_{dir,c}$ : la stessa della fila singola

$H_{rif,c} = 0$  dalla seconda fila

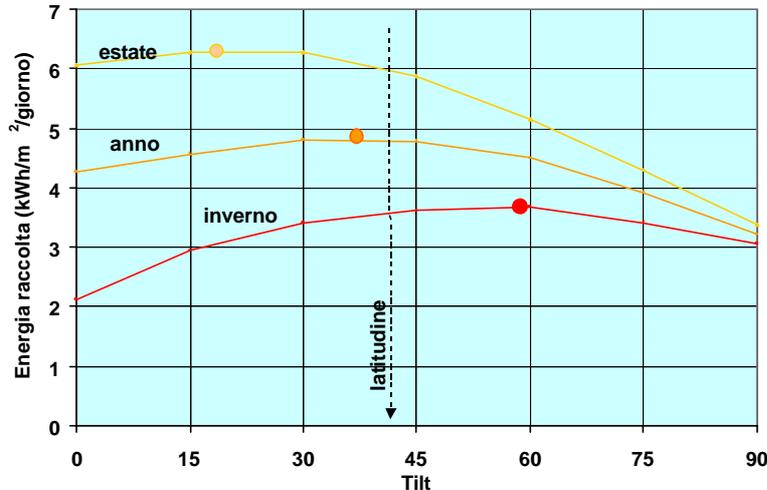
$$H_{dif,o} \text{ to } [1 + \cos(S + (90 - Q_{lim}) + r)] / 2$$



### La scelta dell'angolo di tilt

Per ciascun periodo dell'anno esiste un diverso valore dell'angolo di tilt ottimale, il quale cambia secondo che l'impianto sia a fila singola o a file parallele.

## LA SCELTA DELL'ANGOLO DI TILT



Il picco invernale viene raccolto per angoli di tilt elevati (65°) mentre il picco estivo si ottiene per angoli di tilt piccoli (15°). Il picco su base annuale si ottiene invece per angoli di tilt leggermente inferiori alla latitudine del sito. L'angolo che rende massima l'energia raccolta da file parallele e sempre minore di quello corrispondente a fila singola poiché a parità di inclinazione è minore la radiazione raccolta da file parallele.

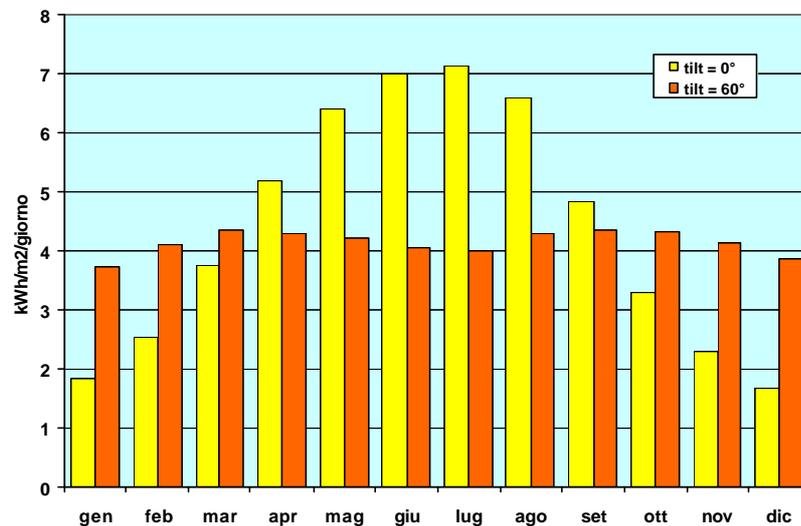
### L'energia raccolta su superficie inclinata

Per l'inclinazione che rende massima l'energia raccolta in inverno, si raccoglie complessivamente nell'anno il 90% della massima energia. Se invece si inclinano i pannelli in modo da rendere massima l'energia raccolta in estate, nel periodo invernale l'energia raccolta è solo il 65% della massima ottenibile in quel periodo. In altre parole il diagramma annuale dell'energia si appiattisce se l'inclinazione è ottimizzata per il periodo invernale.

Viceversa, se l'inclinazione è ottimizzata per il periodo estivo, il diagramma annuale dell'energia presenta un picco durante i mesi estivi.

Per l'Italia si hanno regimi solari medio-alti e con forti variabilità tra regioni continentali e meridionali. Ad esempio, su base annua l'insolazione media giornaliera (su di una superficie con una inclinazione pari alla latitudine) è dell'ordine di 3,6 kWh/m<sup>2</sup> per giorno, in località della pianura padana, 4,7 al Centro-Sud ed arriva a 5,4 kWh/m<sup>2</sup> per giorno in Sicilia.

## ENERGIA RACCOLTA



### Le utenze domestiche

Il dato di base per il dimensionamento di un sistema è rappresentato dal consumo giornaliero di energia elettrica da parte dell'utenza. Tale consumo dipende dalla potenza e dai tempi di utilizzo

degli apparecchi utilizzatori: Qualora sia disponibile il profilo di utenza i consumi possono essere determinati integrando il diagramma di carico.

Generalmente i fattori che determinano la richiesta di energia dipendono dal clima, dal numero di persone e dalla dimensioni dell'abitazione, dalle condizioni economiche della famiglia e dagli usi e dal grado di sviluppo del paese.

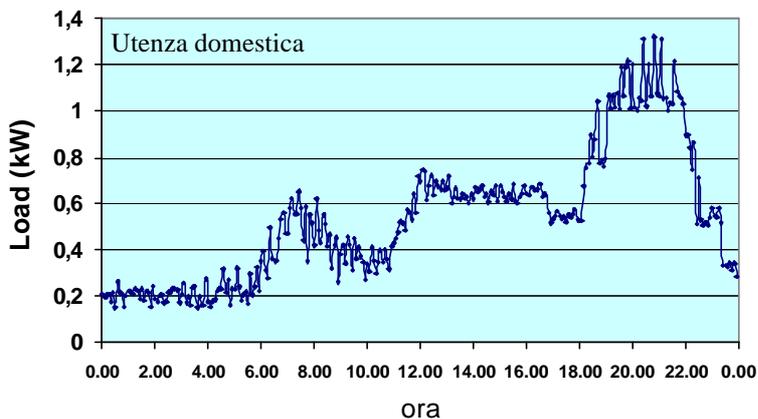
In Italia, rivelazioni statistiche dei consumi di una famiglia di composizione tipica, cioè costituita da tre-quattro persone, effettuate dalle società distributrici, hanno valutato in 2.000 kWh il consumo medio annuo. Inoltre, per il 10% delle utenze è stato valutato un

consumo medio pari a circa 500 kWh/anno mentre per il 15% delle utenze è stato valutato un consumo medio superiore 3.000 kWh/anno

## LE UTENZE DOMESTICHE

- Energia richiesta
  - Dipende dalla potenza e dai tempi di utilizzo dei carichi
  - Integrazione del diagramma di carico
- Fattori che determinano la richiesta di energia
  - Clima
  - Numero di persone e dimensioni dell'abitazione
  - Condizioni economiche
  - Usi e grado di sviluppo del paese
- La richiesta di energia in Italia
  - Media per utenza: 2500 kWh/anno
  - 10% < 800 kWh/anno
  - 15% > 4000 kWh/anno

## IL DIAGRAMMA DI CARICO



### La configurazione dell'impianto

E' determinata essenzialmente dall'uso finale dell'energia prodotta ed è generalmente costituita, oltre che dal generatore fotovoltaico e dal carico, dal dispositivi di inseguimento del punto di massima potenza o convertitore CC/CC, dal convertitore CC/CA o inverter, dal sistema di accumulo, e dal generatore ausiliario.

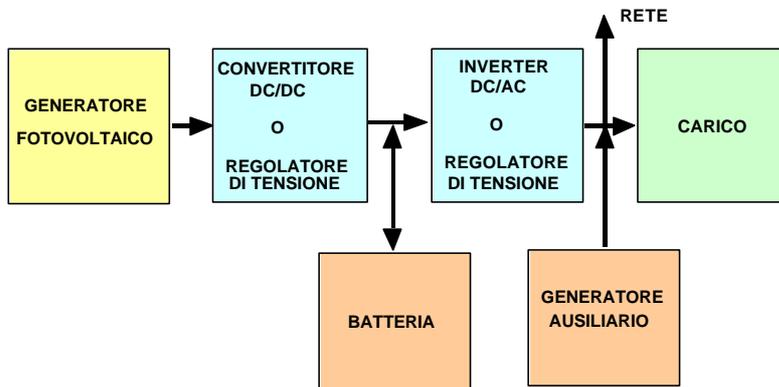
Il convertitore CC/CC consente di ottenere dal

generatore fotovoltaico il massimo di energia utilizzabile, in funzione delle condizioni di funzionamento del moduli e delle caratteristiche degli apparecchi utilizzatori. Tale dispositivo, opportunamente pilotato può assolvere anche alla funzione di controllo di carica delle batterie. In impianti di piccola taglia il convertitore DC/DC viene sostituito, per motivi di costo, con regolatori di tensione tarati in modo da evitare l'eccessiva carica delle batterie

L'inverter consente di alimentare un'utenza funzionante in corrente alternata oppure di trasferire in rete la potenza erogata. Al fine, poi, di assicurare un adattamento ottimale del generatore alla rete o alle esigenze elettriche del carico è necessario corredare l'inverter di opportuni dispositivi che

adattino la tensione d'uscita dell'inverter a quella della rete (trasformatore), e controllino la qualità della potenza immessa in rete, in modo che essa sia compatibile con gli standard richiesti dalla stessa (sistema di filtraggio delle armoniche e di rifasamento).

## SCHEMA A BLOCCHI DI IMPIANTO PV



Nel caso di una utenza isolata dalla rete di distribuzione dell'energia elettrica, poiché la potenza richiesta dall'utente non segue l'intensità dell'insolazione, vale a dire il valore dell'energia prodotta non coincide temporalmente con la richiesta dell'utenza, una parte dell'energia prodotta dal sistema deve essere immagazzinata, per riuscire a soddisfare il

carico in condizioni di irraggiamento insufficiente (il sistema fotovoltaico genera energia nelle ore centrali della giornata, l'utenza la richiede anche nelle ore notturne).

Si impiega quindi, nel caso di utenze isolate, un sistema di immagazzinamento dell'energia elettrica costituito da un banco di accumulatori ricaricabili, dimensionato in modo tale da garantire un'autonomia di funzionamento di 4-5 giorni.

Al fine di evitare un eccessivo

sovradimensionamento del generatore fotovoltaico e del sistema di accumulo, nei sistemi che richiedono un elevato grado di autonomia, si ricorre all'utilizzo di un generatore ausiliario.

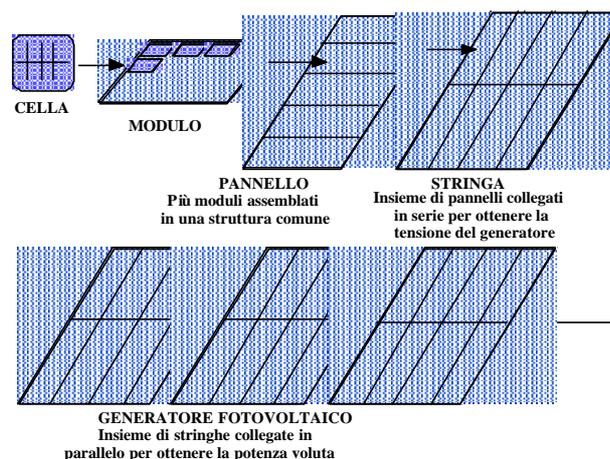
### I componenti del generatore fotovoltaico

Il modulo rappresenta il componente elementare di qualsiasi tipo di sistema fotovoltaico

Più moduli assemblati meccanicamente e elettricamente fra loro

formano un pannello, ovvero una struttura rigida ancorabile al suolo o ad un edificio. Un insieme di pannelli, collegati elettricamente in serie in modo da fornire la tensione richiesta, costituisce una stringa.

## COMPONENTI DEL GENERATORE PV



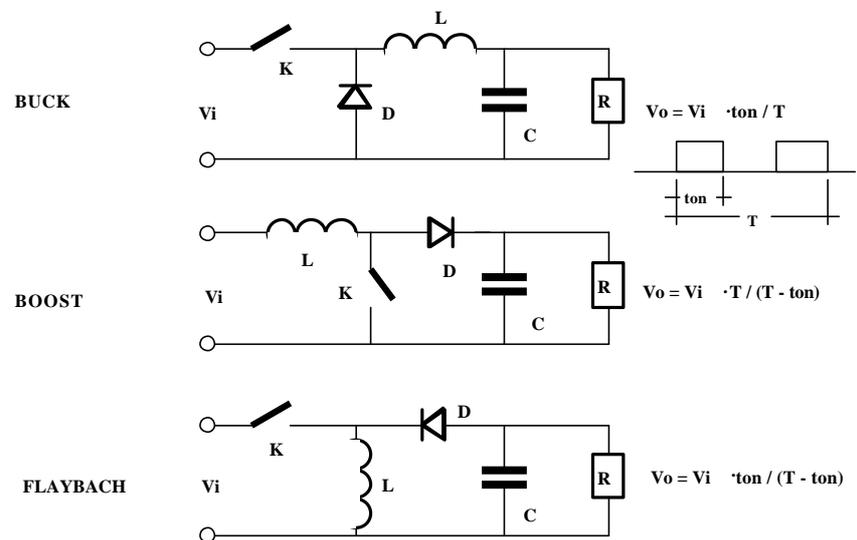
## DC/DC CONVERTER

- **Converte la tensione continua al suo ingresso secondo un rapporto di conversione variabile:  $V_o = k V_i$**
- **Circuiti base:**
  - **BUCK:**  $V_o < V_i$
  - **BOOST:**  $V_o > V_i$
  - **FLAYBACK:**  $V_o <> V_i$
- **USO**
  - **Regolatore di tensione in sistemi con accumulo**
  - **controllo e regolazione di tensione (impianti collegati alla rete)**
  - **Massimizza l'energia prodotta dal generatore fotovoltaico (MPPT) al variare dell'uscita del generatore fotovoltaico**
- **Efficienza: 93 - 96% in un ampio range della potenza di ingresso**

Più stringhe collegate, generalmente in parallelo, per fornire la potenza richiesta, costituiscono il generatore fotovoltaico. Un componente accessorio di moduli e pannelli è rappresentato dalla struttura di sostegno. Essa, generalmente

orientata verso sud, sarà progettata in modo da rispondere ad esigenze di basso costo ed alta affidabilità che ne garantiscano la durata. Una caratteristica non meno importante, quando le specifiche di progetto la richiedano, soprattutto per gli impianti di medie-grandi dimensioni, è quella rappresentata dalla possibilità di variare

## DC/DC CONVERTER BASIC CIRCUITS

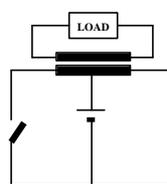


## L'INVERTER

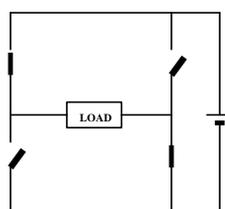
CONVERTE LA TENSIONE DA CONTINUA IN ALTERNATA

- CONFIGURAZIONI:

**PUSH-PULL**



**BRIDGE**



- MODULAZIONE:

- **ON-OFF** uscita ad onda quadra (richiesto filtraggio)
- **PWM** uscita approssimativamente sinusoidale

- COMMUTAZIONE:

- **SELF COMMUTATED:** per impianti isolati o collegati alla rete
- **LINE COMMUTATED:** per impianti collegati alla rete

- **EFFICIENZA:** Varia con la potenza di ingresso e può raggiungere valori del 94 %

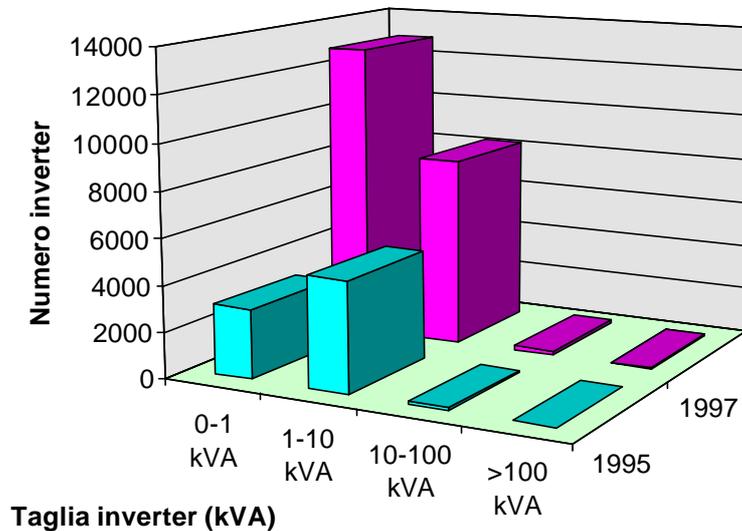
periodicamente l'inclinazione, al fine di permettere la captazione ottimale della radiazione solare. In queste condizioni si ottiene un aumento della producibilità degli impianti paria a circa il 30%.

## L'inverter

Le caratteristiche generali che deve avere l'inverter, compatibilmente con la

funzione a cui è preposto riguardano la potenza nominale, il rendimento e la tipologia.

## PRODUZIONE MONDIALE DI INVERTER PER IMPIANTI COLLEGATI ALLA RETE



Generalmente, per impianti collegati alla rete vengono usati inverter del tipo a commutazione forzata con tecnica PWM (modulazione a larghezza di impulso) senza riferimenti interni ovvero assimilabili a sistemi non idonei a sostenere la tensione in assenza di rete. Tali inverter sono provvisti di controllo MPPT (inseguimento del punto di massima potenza), di sistema di gestione automatica e di protezioni contro i

guasti interni, sovratensioni e sovraccarichi. Inoltre, l'inverter deve rispondere alle norme generali su EMC (compatibilità elettromagnetica) e limitazione delle emissioni RF (radio frequenza).

I parametri di ingresso dell'inverter devono essere compatibili con quelli del generatore fotovoltaico in termini di finestra di tensione operativa, ripple lato dc, poli isolati da terra e isolamento tra lato corrente continua e alternata.

Le caratteristiche di uscita dell'inverter riguardano

essenzialmente il valore della tensione e della frequenza di uscita, la distorsione armonica, il controllo del fattore di potenza e la presenza o meno delle protezioni di massima e minima tensione e frequenza.

### L'INVERTER

- **Caratteristiche generali**
  - Potenza nominale
  - Rendimento
  - Modo di operare (MPPT, avviamento e spegnimento automatico)
  - Protezioni (guasti interni, sovratensioni e sovraccarichi)
  - Emissioni (E.M. (CEI 110-1/6/8) e rumore)
  - Conformità marchio CE
- **Caratteristiche di ingresso**
  - Campo tensione di ingresso
  - Ripple lato DC
  - Poli isolati da terra (controllo isolamento, CEI 64-8)
  - Isolamento tra lato DC e AC
- **Caratteristiche di uscita**
  - Tensione e frequenza di uscita
  - Distorsione totale e singola (CEI 110-31)
  - Controllo rifasamento (CEI 11-20)
  - Protezioni in tensione frequenza (certificate) (CEI 11-20)
  - Assenza di riferimenti interni (CEI 11-20)

## L'ACCUMULO ELETTRICO

- accumula l'energia elettrica prodotta dal generatore fotovoltaico di giorno per renderla disponibile di notte o in condizioni meteorologiche sfavorevoli
- TIPO: piombo-acido
- CARATTERISTICHE:
  - TAGLIA: massima carica accumulabile ( $C_{max}$ )
  - STATO DI CARICA: livello di energia esistente nella batteria
  - EFFICIENZA: tiene conto delle perdite durante i processi di carica e scarica (85%)
  - MINIMO STATO DI CARICA AMMESSO :  $C_{min}$
  - RESTORING CAPACITY :  $C_{re} = 0.8 C_{max}$
  - GIORNI DI AUTONOMIA:  $N_b = (C_{max} - C_{min}) \cdot h_i \cdot h_b / E_l$  (giorno)
- GESTIONE (per evitare danni dovuti a sovraccariche o scariche profonde)
  - valutazione dello stato di carica (integrazione, densità)
  - controllo della tensione di batteria
- MANUTENZIONE:
  - equalizzazione: ciclo di carica periodico
  - rabbocco: a seguito di gassificazione e/o normale evaporazione

### Gli impianti collegati alla rete

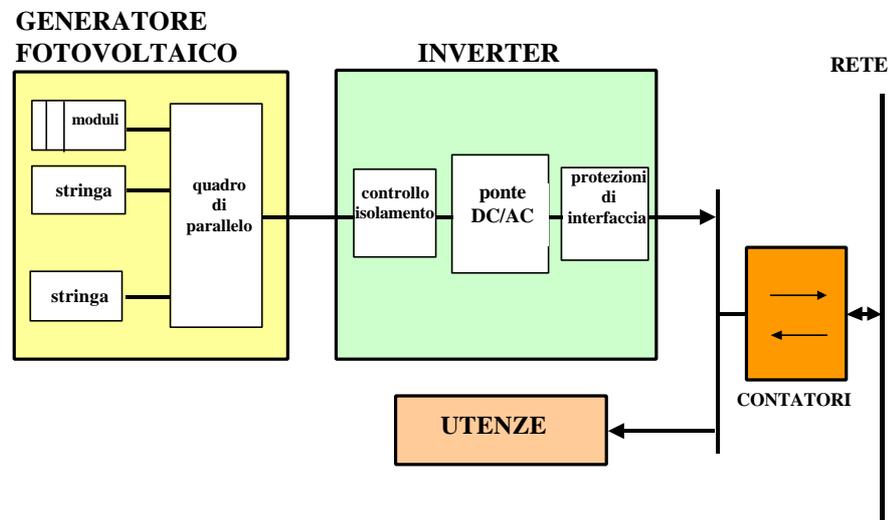
Gli impianti collegati alla rete sono costituiti da due componenti principali: il generatore fotovoltaico e il sistema di conversione. Le stringhe in cui è suddiviso il generatore fotovoltaico sono generalmente raccolte in parallelo all'interno di un quadro elettrico. Ciascuna stringa, singolarmente sezionabile, è

provvista di diodo di blocco e idonei scaricatori di protezione.

Il sistema di conversione contiene il misuratore continuo dell'isolamento provvisto di indicatore e blocco in presenza di anomalie, l'inverter e le protezioni di interfaccia.

Il collegamento dell'impianto alla rete elettrica di distribuzione, nel caso tipico di applicazione del regime di scambio sul posto dell'energia elettrica prevede un contatore per la misura dell'energia prelevata dalla rete e un misuratore dell'energia immessa in rete.

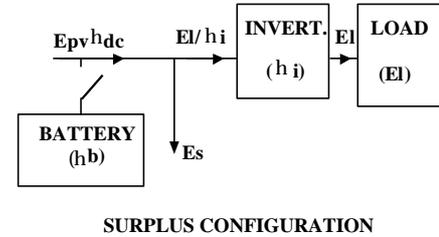
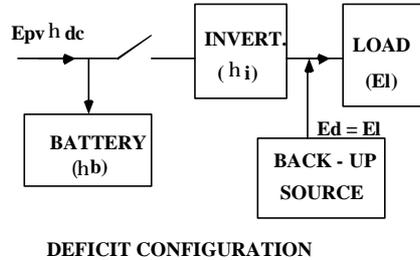
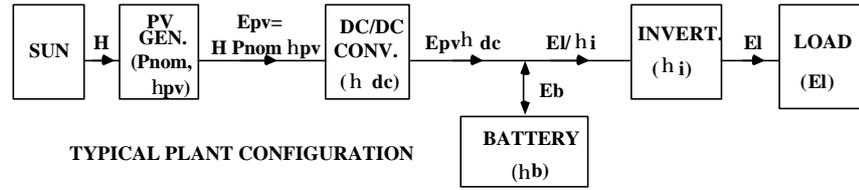
## IMPIANTO CONNESSO ALLA RETE



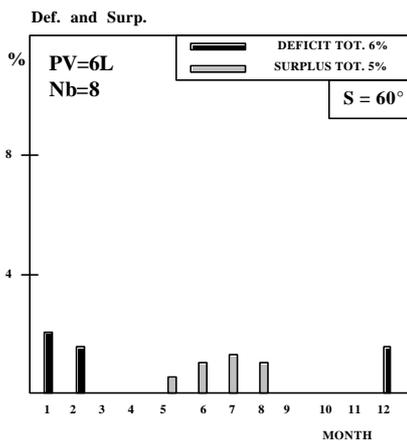
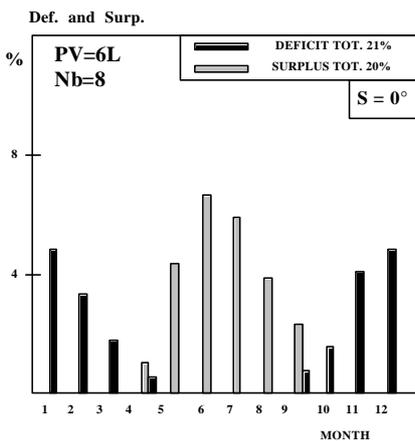
# IMPIANTO ISOLATO

## Gli impianti isolati

Tali impianti sono costituiti da un generatore fotovoltaico, un DC/DC converter per l'inseguimento del punto di massima potenza, un sistema di accumulo, un inverter e un carico. In condizioni normali l'energia prodotta dal generatore fotovoltaico fluisce nel carico e nella batteria. Se il

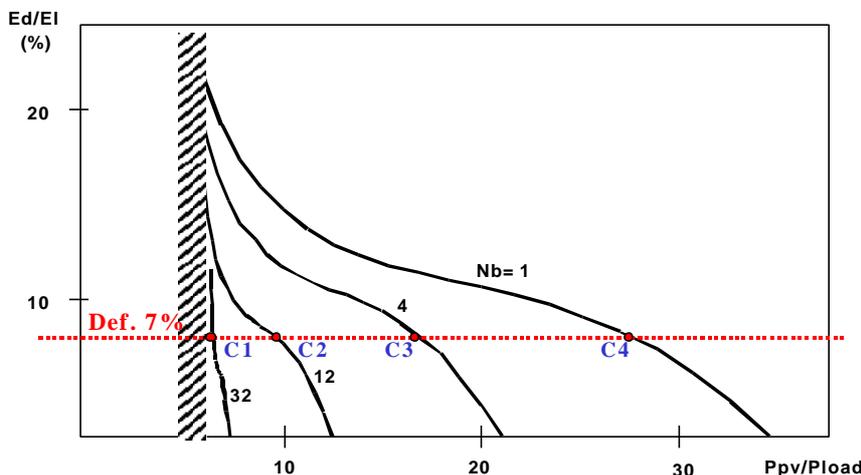


## BILANCIO ENERGETICO MENSILE

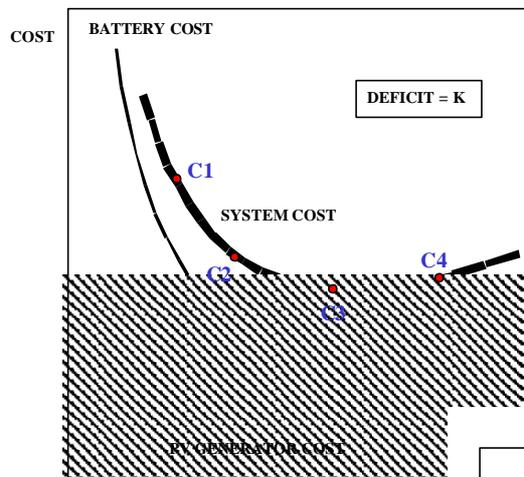


carico richiede una energia superiore a quella prodotta dal generatore fotovoltaico, la differenza viene fornita dalla batteria. In situazioni di batteria scarica e domanda di energia eccedente quella prodotta, il campo fotovoltaico viene connesso alla batteria ed il carico viene connesso a una fonte integrativa che fornisce l'energia  $E_d$  (deficit di energia rispetto alla richiesta). Se invece la batteria è completamente carica e l'offerta di energia eccede la domanda, il surplus  $E_s$  viene dissipato

## BILANCIO ENERGETICO



## COSTO DEL SISTEMA



comprasse in anticipo l'energia che verrà consumata nell'arco di vita dell'impianto (25 anni).

Il costo complessivo di realizzazione di un impianto fotovoltaico dipende essenzialmente dalla tipologia e dalla taglia dell'impianto.

Per una centrale fotovoltaica di grande taglia, ad esempio da un MWp, il costo dell'impianto è di circa 12 milioni di lire/kW. Questo costo è dovuto, per circa il 50%, al costo dei moduli e, per la parte

## GLI ASPETTI ECONOMICI

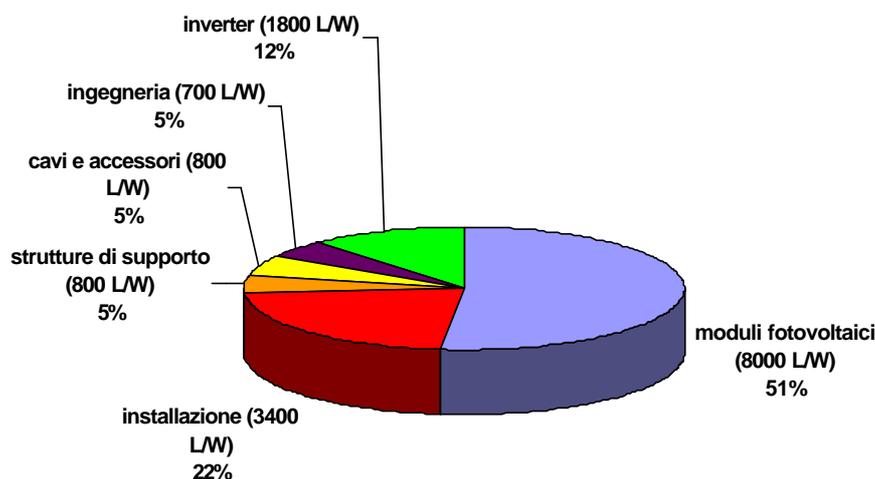
### Il costo degli impianti fotovoltaici

La peculiarità economica dell'energia fotovoltaica è data dal fatto che essa richiede un forte impegno di capitale iniziale e basse spese di mantenimento. Un po' come se si

## IMPIANTI ISOLATI COSTO DEI COMPONENTI

- **COSTI PROPORZIONALI ALLA TAGLIA DEL GENERATORE PV**
  - moduli fotovoltaici 4 €/W
  - strutture di supporto 40 €/m<sup>2</sup>
  - cablaggi elettrici 300 €/kW
  - preparazione del sito 10 €/m<sup>2</sup>
  - dc/dc converter 200 - 1000 €/kW
- **COSTI PROPORZIONALI ALLA TAGLIA DELLA BATTERIA**
  - alloggiamento batterie 100 €/kWh
  - batterie 250 €/kWh \* N. ricambi
- **COSTI PROPORZIONALI ALLA POTENZA MASSIMA DEL CARICO**
  - inverter 200 - 700 €/kW

## DISTRIBUZIONE DEI COSTI impianti connessi alla rete



rimanente, al costo degli altri componenti del sistema e dell'installazione. I costi annui di manutenzione e gestione sono dell'ordine dello 0,5% del costo dell'investimento. Nel caso di sistemi fotovoltaici per utenze isolate, i costi sono dell'ordine dei 18-24 milioni di

lire/kWp. Tali elevati valori sono spiegati dalla necessità di dotare il sistema di batterie di accumulatori.

Nel caso invece di sistemi fotovoltaici integrati negli edifici e collegati direttamente alla rete in bassa tensione, il costo dell'impianto è attualmente pari a circa 15 ÷ 16 milioni di lire/kWp.

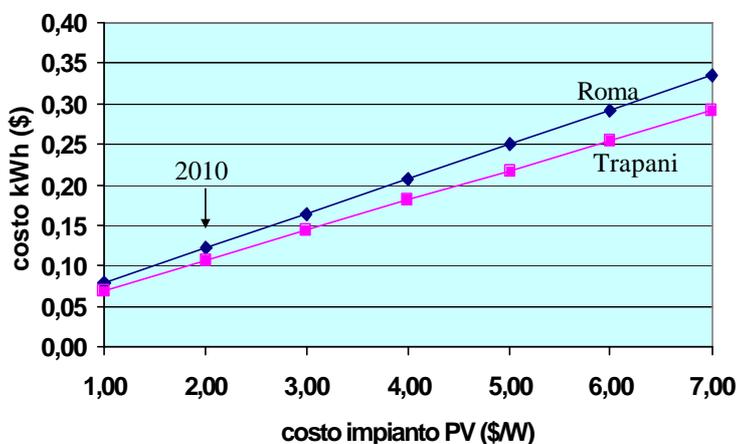
Tale costo è legato al tipo di componenti scelti e alla tipologia di impianto installato. Il prezzo dei moduli fotovoltaici varia dalle 7.000 alle 8000 lire/W e incide per il 45 - 50% sul costo dell'impianto. L'inverter non pesa considerevolmente sul costo dell'impianto (13 - 15%). Il costo della struttura di sostegno dei moduli è difficile da stimare perché dipende da vari fattori quali il materiale utilizzato, il luogo di installazione, la superficie di appoggio, ecc. In prima approssimazione essa incide sul costo dell'impianto per circa il 10%. Analoghe percentuali sono relative all'installazione e trasporto, all'ingegneria e ai cavi e accessori.

### 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 25 anni, e dal tasso di interesse reale, cioè depurato del tasso di inflazione, posto pari al 3%.

### COSTO DEL kWh



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

**IL COSTO DEL kWh**

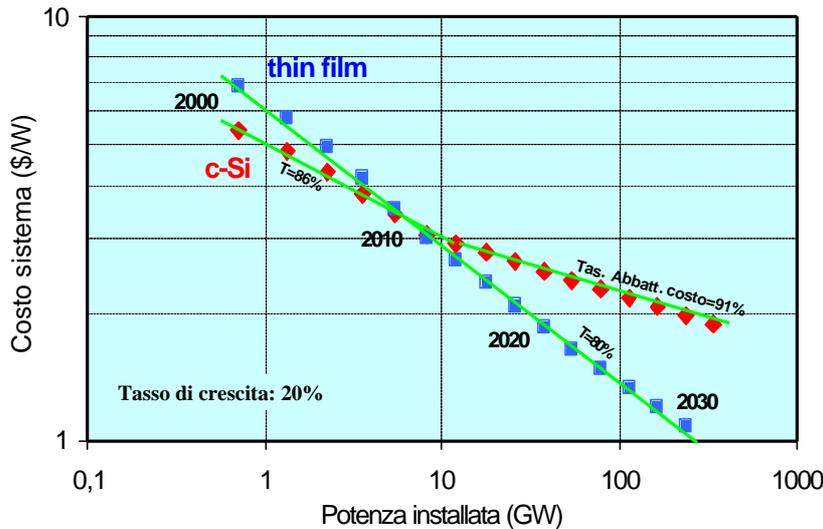
$C = (C_i \cdot A + C_m) / E$

- **C<sub>i</sub>: costo dell'impianto**
  - 14 - 16 Mlit/kW (grid-connected)
  - 18 - 24 Mlit/kW (stand alone)
- **A: fattore di annualizzazione =  $r / (1 - (1+r)^{-T})$** 
  - r: tasso di interesse (5%)
  - T tempo di vita dell'impianto (25 anni)
- **C<sub>m</sub>: costo annuale di manutenzione (0,1 - 0,2 Mlit/kW)**
- **E: energia prodotta in un anno (1000 - 1300 kWh/kW)**

- **C: costo del kWh**
  - 600 - 700 Lit/kWh (grid-connected)
  - 1.000 - 1.200 Lit/kWh (stand alone)

## LEARNING CURVE SISTEMI



circa 15 ÷ 16 milioni di lire/kW e di un costo di manutenzione paria 200.000 lire/anno si ottiene un costo attualizzato dell'energia elettrica prodotta quantificabile in circa 650 lire/kWh in condizioni di soleggiamento medio (circa 1.600 kWh/m<sup>2</sup> per anno). Nel caso invece di sistemi fotovoltaici per utenze isolate, i cui costi sono dell'ordine

dei 18 -24 milioni di lire/kWp, il corrispondente costo attualizzato del kWh è dell'ordine delle 1.000-1.300 lire.

### Il valore aggiunto del fotovoltaico

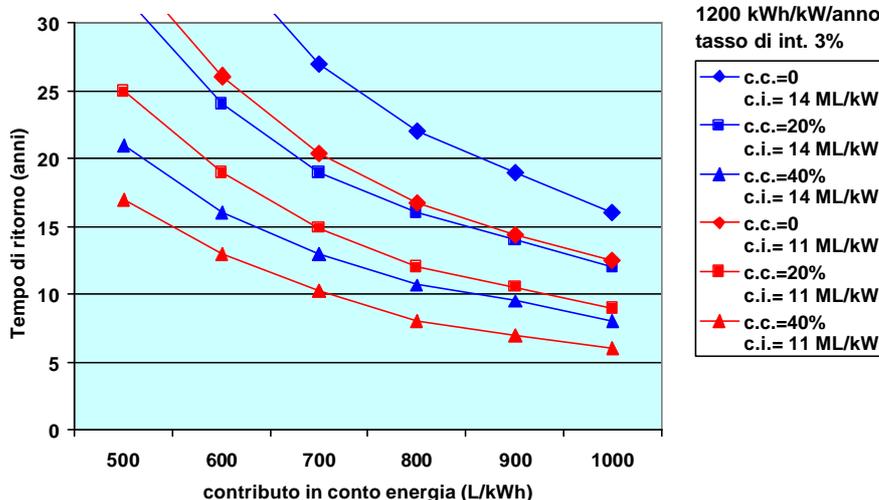
Il costo del kWh da fonte fotovoltaica viene "istintivamente" confrontato con quello pagato dall'utente alle società elettriche

## PAY-BACK TIME

- Incentivo in conto capitale: 75%
- Costo impianto: 15,5 Mlit/kW
- Spesa soggetto richiedente:  $15,5 * 0,25 + 10\%(IVA) = 5,4 \text{ Mlit/kW} - 36\% = 3,4 \text{ Mlit/kW}$
- Energia prodotta: 1.100 kWh/kW/anno (275.000 lire)
- Tempo di ritorno: 12 anni

### PAY-BACK TIME

## CONTRIBUTO MISTO



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 delle 300 lire/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 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

## IL VALORE AGGIUNTO

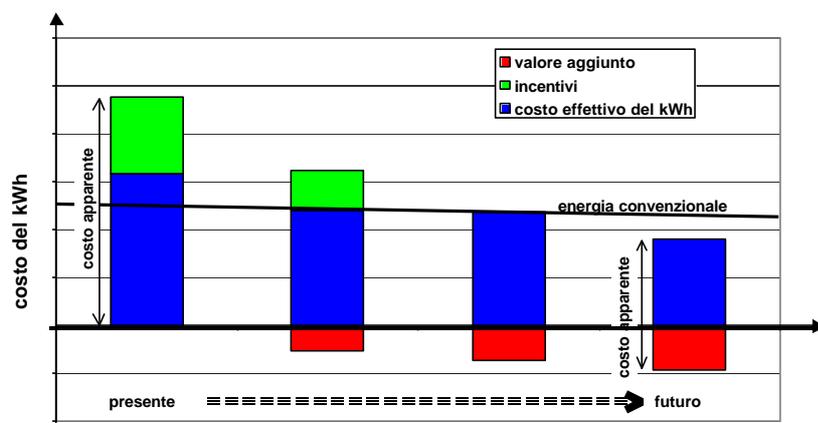
- **Elettrico**
  - Miglioramento parametri della rete (picchi, trasmissione)
  - Emergenza
  - Utenze isolate (trasporto carburante o collegamento a rete)
- **Ambientale**
  - Riduzione emissioni e piogge acide
- **Architettonico**
  - Rivestimento
  - Isolamento termico e acustico
  - Protezione da acqua e fuoco
  - Schermo onde elettromagnetiche
- **Socio economico**
  - Lavoro indotto
  - Diversificazione risorse
  - Ricadute tecnologiche

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.

## IL VALORE AGGIUNTO



## IL PROGRAMMA “TETTI FOTOVOLTAICI”

### I programmi nazionali

Il costo della tecnologia fotovoltaica non rende nell'immediato realistico ricorrere a questa fonte di energia, né per incrementare l'autonomia energetica di una nazione, né per ridurre in maniera significativa le emissioni di gas serra. Ciononostante, tra le varie fonti rinnovabili il fotovoltaico,

## PROGRAMMI DI DIFFUSIONE

	<i>Programma</i>	<i>Periodo</i>	<i>Potenza (MW)</i>	<i>Budget (MUSD)</i>	<i>Incentivi</i>
Australia	Renewable Remote Power Generation	2001 - 2004	40	144	50% cc
	Household PV Systems	2001 - 2004	18	17	3 000 \$/plant
Canada	Action Plan 2000 for Climate change	2001	0,1	1,1	100%
Finland	Action Plan for Renewable Energy	2000 - 2010	40	100	30% cc
France	Grid-connected BIPV	2000 - 2003	0,5	2	40% cc
	off-grid domestic PV	2000 - 2003	1,2	20	95% cc
Germany	100 000 rooftop	1999 - 2003	300	300	0.56 E/kWh
England	Large scale BIPV	2001 - 2003	0,4	4,2	100%
Italy	roof-top	2001 - 2002	7	40	75% cc
Japan	Demonstration and field test	1998 - 2010	5 000	350 (2000)	30%
	Residential PV System Dissemination	1994 - 2002	170 (2000)	425	25%
Netherland	Floriade & The City of the Sun	2000	3	9	3 \$/W
USA	Million Solar Roofs	1999 - 2010	3 000		
	Pioneer II	1999 - 2004	5		
	California PV subsidy	2000	0,8	2,4	3 \$/W
	Utility PV Group	2000	1	2,5	25%

per le sue caratteristiche intrinseche, si presenta come la fonte più attraente e promettente per la produzione locale e diffusa di energia elettrica.

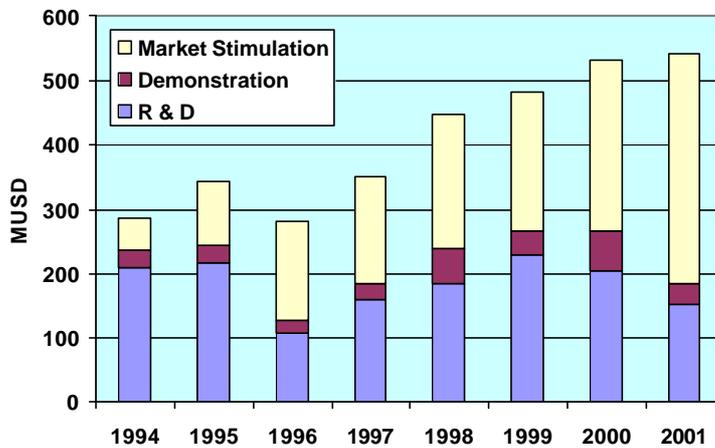
Per questo motivo il fotovoltaico è ritenuto di una valenza strategica tanto elevata che molti paesi come Giappone, Germania e Stati Uniti hanno deciso di farne oggetto di impegnativi programmi. In particolare, il Giappone ha già installato alcune centinaia di MW e ha

### PROGRAMMI NAZIONALI

- **STRATEGIE E MOTIVAZIONI**
  - costituzione di un mercato di dimensioni significative stabile nel tempo
  - diffusione della tecnologia
  - rafforzamento delle industrie interessate
  - definizione di programmi di ricerca finalizzati allo sviluppo di prodotti più competitivi
  - ricaduta occupazionale
- **OBIETTIVO FINALE**
  - raggiungimento della competitività economica
    - fattore di scala
    - miglioramenti tecnologici

deciso di arrivare a 4.000 MW entro il 2010 mentre negli Stati Uniti è stato avviato un ambizioso

## INVESTIMENTI PUBBLICI



programma che prevede la realizzazione di un milione di tetti per il 2010. Altri progetti sono stati avviati in Germania (100.000 tetti), in Olanda (40.000 tetti) e a livello di Comunità Europea (500.000 tetti e 500.000 sistemi isolati per paesi in via di sviluppo).

Nel contesto internazionale, così come si è configurato fino a oggi, l'Italia è riuscita ad essere sufficientemente competitiva potendo contare su un sistema industriale

complessivamente valido, su un'attività di che va dai materiali ai sistemi e su una potenza installata di circa 20 MW che ha consentito di maturare una significativa esperienza in campo. Per far sì che questo patrimonio nazionale di competenze e risorse fino ad oggi accumulato non vada disperso si è ritenuto opportuno definire anche in Italia un programma nazionale di grande respiro finalizzato a una forte integrazione fra i vari operatori individuando opportuni incentivi finanziari per la

diffusione di questa tecnologia.

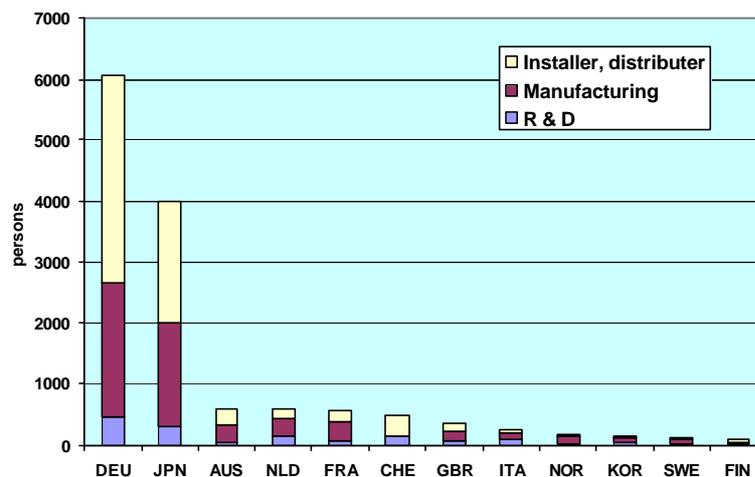
Questo meccanismo di incentivazione

porterà alla costituzione di un mercato di dimensioni

significative e stabile nel tempo tale da permettere di effettuare

investimenti tesi alla riduzione dei costi sia dovuti al fattore di scala sia dovuti allo sviluppo di componenti più competitivi

## DISTRIBUZIONE DELLE ATTIVITA'



### **Il programma italiano “tetti fotovoltaici”**

Il programma è in linea con gli obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni di gas serra e in accordo con le prescrizioni del Libro Bianco per la valorizzazione delle fonti rinnovabili. E' stato definito e avviato dal Decreto Direttoriale del Ministero dell'Ambiente n. 106 del 13/3/2001 e si propone la realizzazione di impianti fotovoltaici di taglia da 1 a 50 kW, collegati alla rete elettrica di distribuzione in bassa tensione e installati/integrati nelle strutture edilizie (tetti, facciate, pensiline, ecc.). Nel periodo 2001-2003 sono previsti tre specifici progetti:

- impianti fotovoltaici per i soggetti pubblici (10 milioni di €) gestito dal Ministero dell'Ambiente;
- interventi fotovoltaici (da almeno 30 kW) ad alta valenza architettonica (1,5 milioni di €);
- impianti fotovoltaici per i soggetti privati e pubblici (30 milioni di €) gestito dalle Regioni e dalle Province Autonome.

Complessivamente, gli incentivi del Ministero dell'Ambiente attivano, in questo periodo, investimenti per 53 milioni di €, con la realizzazione di circa 2.000 impianti di piccola e media taglia, ed una potenza installata di circa 7 MW.

## **IL PROGRAMMA TETTI FOTOVOLTAICI**

- **Avviato a marzo 2001**
- **Dedicato alla realizzazione di impianti fotovoltaici da 1 a 20 kW connessi alla rete e integrati o installati su edifici**
- **Incentivi economici: fino al 75% del costo di impianto**
- **Massimo costo ammesso:**
  - 7 €/W – 8 €/W
  - +20% per impianti integrati nelle strutture edilizie
- **Fondi iniziali: 40 M€**
- **Fondi addizionali: 74 M€**
  - **Investimento totale: 156 M€**
  - **Capacità attesa: 21 MW**
- **Organizzato in 3 sottoprogrammi**

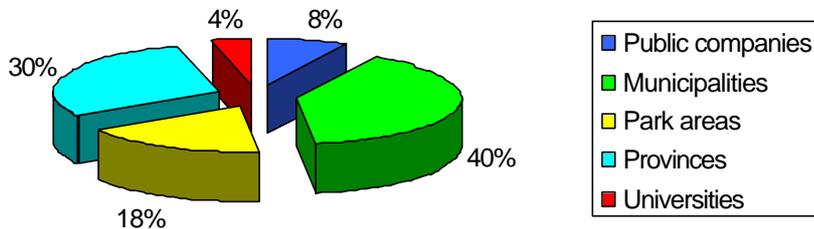
### **1° SOTTOPROGRAMMA**

- **Gestito dal Ministero dell'Ambiente**
- **Disciplinato da bando ministeriale (Marzo 2001)**
- **Beneficiari: Soggetti pubblici**
- **Domande presentate: 580 (6,5 MW, 36 M€)**
- **Fondi iniziali: 10 M€(stanziati dal Ministero)**
  - **Domande ammesse: 150 (1,8 MW)**
- **Fondi addizionali: 12 M€(Ministero) + 12 M€(Regioni)**
  - **Domande addizionali ammesse: 350 (4,2 MW)**

### **Il sottoprogramma rivolto ai soggetti pubblici**

Tale sottoprogramma è stato disciplinato dal bando emanato dal Ministero dell'Ambiente il 29/3/2001. Il termine utile per la spedizione delle domande è scaduto il 27/6/2001. Le domande pervenute sono state circa 580 (6,5 MW e 64 miliardi di lire di investimenti) ed è stata effettuata, secondo l'ordine di spedizione, la relativa

1° sottoprogramma  
**BENEFICIARI**

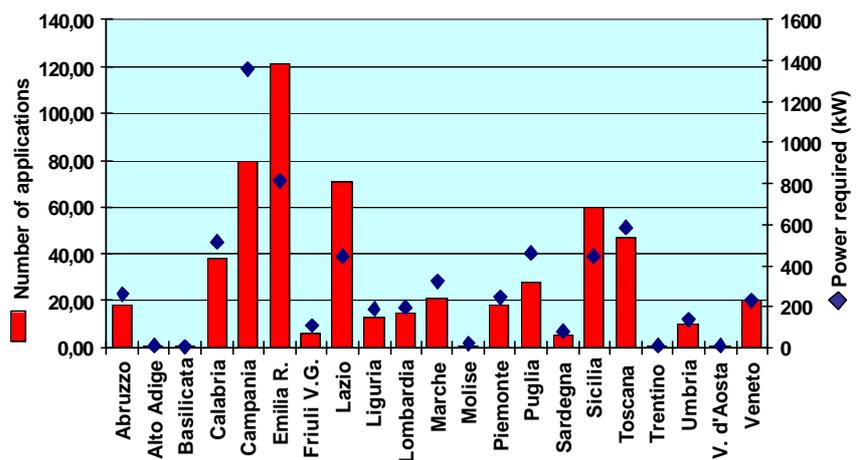


valutazione da parte di una Commissione Tecnica formata rappresentanti dell'ENEA, del Ministero dell'Industria, del Ministero dell'Ambiente e del Ministero dei Beni Culturali e Ambientali. La Commissione Tecnica ha escluso dalla concessione a contributo pubblico gli interventi che presentano gravi inesattezze tecniche o, nel caso di interventi da attuare in aree soggette a vincoli, che non risultavano adeguatamente inseriti nella struttura edilizia.

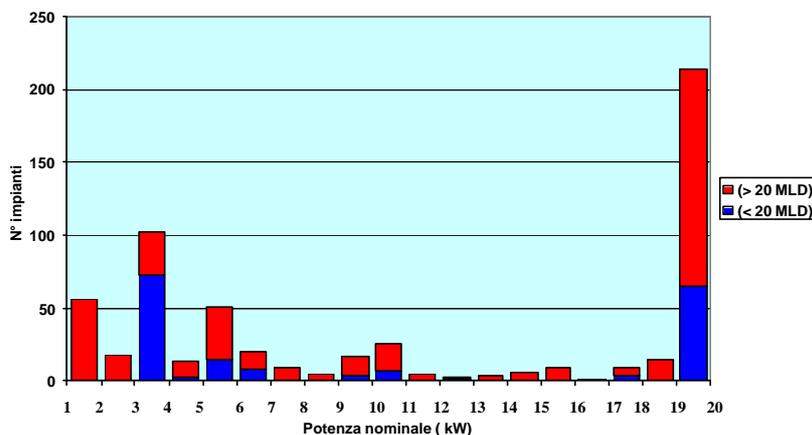
Gli interventi ammessi riguardano impianti di potenza compresa tra 1 e 20 kW i cui generatori fotovoltaici sono installati o integrati in strutture edilizie. Gli impianti fotovoltaici devono essere conformi alla specifica tecnica di fornitura predisposta dall'ENEA.

I soggetti ammessi sono i Comuni Capoluogo di Provincia, le Province, le Università statali e gli

1° sottoprogramma  
**DOMANDE PRESENTATE**

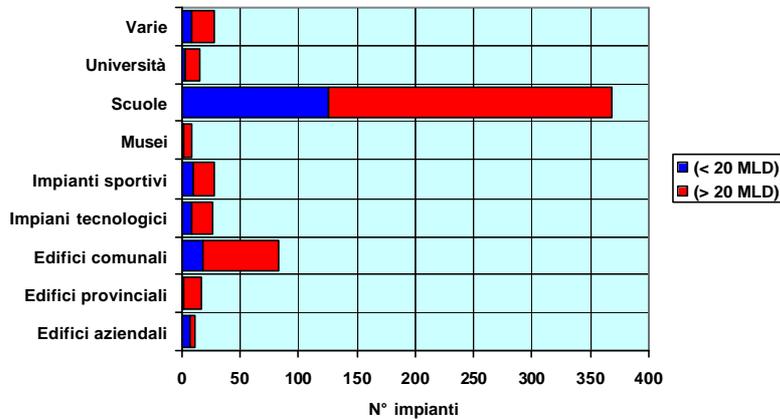


**TAGLIE DEGLI IMPIANTI**



Enti pubblici di ricerca proprietari della struttura cui si riferisce l'intervento. Nel caso in cui viene esercitato altro diritto di godimento è necessaria l'autorizzazione del proprietario. E' altresì obbligatorio, ai fini dell'ammissione al contributo, che la titolarità del contratto di fornitura sia in capo a

### TIPOLOGIA DELLA STRUTTURA EDILIZIA



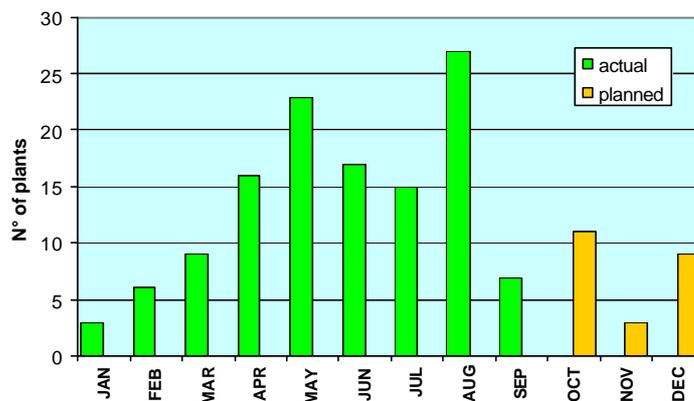
organismi di diritto pubblico.

L'entità del contributo pubblico in conto capitale è fissata nella misura del 75% del costo di impianto, IVA esclusa. Per la realizzazione degli impianti di potenza compresa tra 1 e 5 kW il costo massimo, riconosciuto dal Programma, è fissato il 15,5 milioni per kW installato; per impianti di potenza superiore, e comunque fino a 20 kW,

detto costo massimo decresce dai 15,5 ai 14 milioni per kW installato, all'aumentare della potenza. Nel caso di impianti da installare presso aree protette, o di impianti che conseguano la completa integrazione del generatore fotovoltaici nella struttura edilizia, il costo massimo dell'impianto

### I SOTTOPROGRAMMA

## IMPIANTI INSTALLATI (2002)



## 2° SOTTOPROGRAMMA

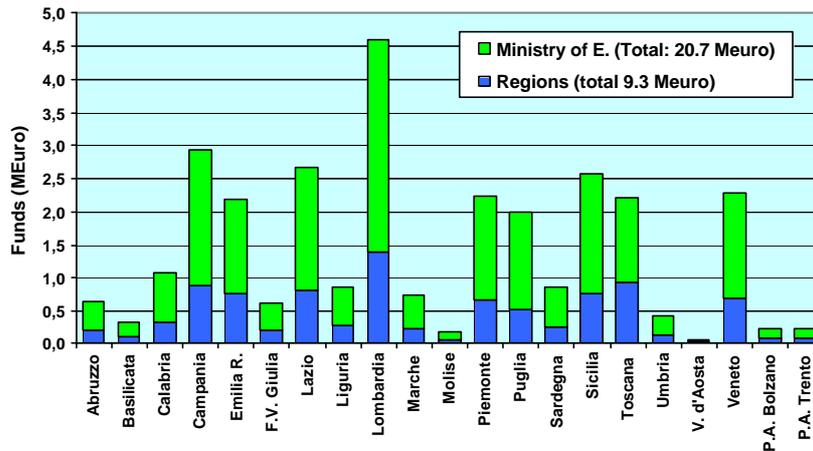
- Gestito da Regioni e Province Autonome
- Disciplinato da bandi regionali
- Beneficiari: cittadini, società e enti pubblici
- Fondi iniziali: 20.7 M€(Ministero) + 9.3 M€(Regioni)
- Impianti attesi: 1800 (5.2 MW)
- Domande presentate: 5700
- Incentivi richiesti: 50% – 75%

riconosciuto dal Programma può essere aumentato fino ad un massimo del 20%.

### Il sottoprogramma rivolto ai soggetti privati e pubblici

Tutte le Regioni e Province Autonome hanno aderito al

## 2° Sottoprogramma

**DISTRIBUZIONE DEI FONDI INIZIALI**

sottoprogramma con un cofinanziamento complessivo pari a circa 9 milioni di € Tenuto conto che il finanziamento del Ministero dell'Ambiente è di 20 milioni, le risorse disponibili ammontano a 58 miliardi. E' quindi prevista la realizzare di oltre 2.000 impianti per una potenza complessiva pari a

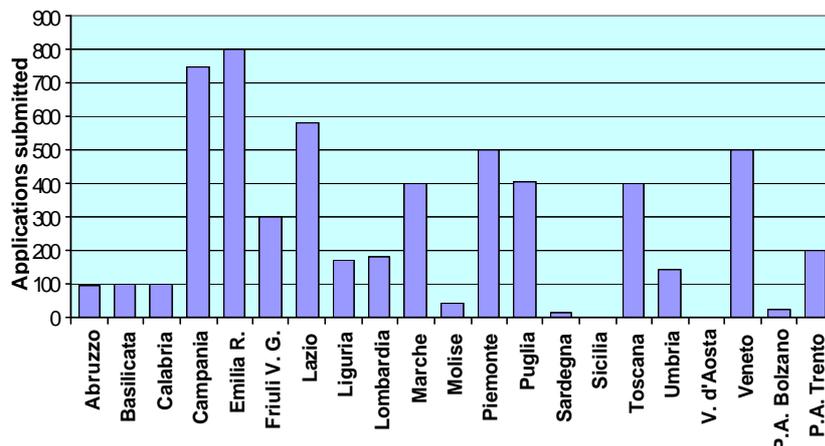
2<sup>nd</sup> SUB-PROGRAM**BANDI REGIONALI**

circa 5 MW. La ripartizione dei fondi ministeriali è stata effettuata fra le Regioni e le Province Autonome in proporzione al numero degli abitanti. Il 3% del contributo pubblico sarà riservato alla campagna di monitoraggio dell'iniziativa. Attualmente le Regioni stanno completando l'analisi

Region	Announcement issue	Announcement deadline
Abruzzo	15 Nov. 2001	15 Feb. 2001
Basilicata	26 Oct. 2001	10 Dec. 2001
Calabria	08 Aug. 2001	31 Oct. 2001
Campania	20 Nov. 2001	15 Feb. 2002
Emilia R.	17 Jul. 2001	15 Oct. 2001
Friuli V. G.	12 Sep. 2001	10 Dec. 2001
Lazio*	06 Sep. 2001	06 Feb. 2002
Liguria	30 Aug. 2001	13 Dec. 2001
Lombardia	01 Dec. 2001	13 Mar. 2002
Marche	30 Aug. 2001	30 Oct. 2001
Molise	16 Aug. 2001	15 Nov. 2001
Piemonte	03 Aug. 2001	29 Nov. 2001
Puglia	15 Nov. 2001	15 Feb. 2002
Sardegna	30 Aug. 2001	28 Nov. 2001
Sicilia		
Toscana	10 Oct. 2001	up to fund run out
Umbria	20 Aug. 2001	25 Dec. 2001
V. d'Aosta	14 Aug. 2001	up to fund run out
Veneto	02 Aug. 2001	30 Nov. 2001
P.A. Bolzano	28 Aug. 2001	30 Nov. 2001
P.A. Trento	annual announc.	30 Jun.

2<sup>nd</sup> SUB-PROGRAM**DOMANDE PRESENTATE**

(Total: 5700)



dei progetti presentati. L'entità massima del contributo che sarà erogato dalle Regioni è fissata nella misura non superiore al 75% del costo di impianto. La tipologia e la taglia degli interventi ammessi, analogamente al sottoprogramma rivolto ai soggetti pubblici, è riferita a impianti da 1 a 20 kW connessi alla rete e installati/integrati su strutture edilizie. Anche i

costi massimi di investimento riconosciuti saranno gli stessi del sottoprogramma rivolto ai soggetti pubblici.

Le Regioni e le Province Autonome dovranno comunicare periodicamente al Ministero dell'Ambiente le informazioni riguardanti le attività svolte e dovranno trasmettere all'ENEA le informazioni relative alle domande, specificando i dati tecnici degli impianti approvati. Nell'ambito delle attività di monitoraggio dell'iniziativa, esse dovranno altresì trasmettere periodicamente i principali dati di esercizio degli impianti realizzati.

## LA SECONDA FASE DEL PROGRAMMA

- **Gestito dalle Regioni**
- **Fondi: 50 MEuro**
- **Capacità attesa: 10.5 MW**
- **Incentivi economici: fino al 70% del costo di investimento**
- **Riduzione del massimo costo ammesso**
- **Incremento del costo di investimento per impianti integrati**
- **Contributo in conto produzione per impianti > 20 kW**
- **Valutazione automatica dei progetti**

A differenza del bando per i soggetti pubblici, i bandi emessi dalle Regioni e dalle Province Autonome sono del tipo "chiuso" nel senso che alle domande pervenute in un fissato periodo di tempo è stato attribuito un punteggio dipendente essenzialmente dalla tipologia dell'impianto e dal preventivo di spesa. L'ammissione al contributo è avvenuta, compatibilmente con i finanziamenti disponibili, in base al punteggio ottenuto.

Un'altra caratteristica di questo sottoprogramma riguarda il fatto che alcune Regioni sono state orientate verso gli "accordi volontari" consistenti nel formare, tramite avviso di interesse e pubblicare una lista degli installatori. In questo caso gli interessati si sono rivolti, per la realizzazione dell'impianto e, in generale per l'assistenza all'iter per l'ottenimento del contributo, solo ed esclusivamente a uno degli installatori riportati nell'elenco.

Presumibilmente, le modalità di presentazione delle domande e i tempi concessi per la realizzazione degli interventi saranno sostanzialmente analoghi a quelli relativi al sottoprogramma rivolto ai soggetti pubblici.

### **Il sottoprogramma interventi fotovoltaici ad alta valenza architettonica**

Gli interventi ammessi, di potenza non inferiore

## SOTTOPROGRAMMA TETTI PV AD ALTA VALENZA ARCHITETTONICA

- **Gestito dal Ministero dell'Ambiente**
- **Risorse disponibili: 1,6 M€**
- **Soggetti ammessi: Enti Pubblici**
- **Interventi: impianti (>30 kW) integrati nella struttura edilizia**
- **Costo massimo riconosciuto: 13 €/W**
- **Contributo: 85%**
- **Progetto architettonico**
  - simulazione tridimensionale che evidenzia il rapporto con l'ambiente
  - elaborati comprovanti la valenza architettonica e energetica ambientale e l'innovazione di progetto
- **termine di presentazione della domanda: 31/1/2002**
- **temine lavori: 2 anni dall'inizio lavori**
- **Progetti ammessi**
  - Comune di Firenze - Ospedale (30,1 kW)
  - Provincia di Rovigo - Edificio Scolastico (34 kW)
  - Comune di Trevignano - Impianto sportivo (40 kW)
  - Comune di Imperia - Impianto sportivo (109 kW)

a 30 kW, devono prevedere la completa integrazione del generatore fotovoltaici all'edificio e il collegamento dell'impianto alla rete

Possono presentare domanda di contributo, entro il 31 gennaio 2002, gli enti pubblici proprietari o gestori della struttura edilizia oggetto dell'intervento.

Il costo massimo riconosciuto dal programma è fissato in lire 25 milioni di lire per kW e gli interventi sono finanziati con un contributo dell'85% non inclusivo dell'IVA.

Il progetto architettonico dovrà prevedere una simulazione tridimensionale che evidenzi anche il rapporto con l'ambiente circostante e gli elaborati di dettaglio comprovanti l'elevata valenza architettonica ed energetico-ambientale dell'intervento, nonché l'innovazione di progetto.

L'inizio dei lavori relativi all'intervento deve avvenire entro 180 giorni dall'accoglimento della domanda di contributo mentre il completamento delle opere deve essere effettuato entro 730 giorni dall'inizio lavori.

### **La domanda di contributo**

Le domande di contributo, conformi a un modello predisposto e sottoscritte dal soggetto richiedente (proprietario della struttura edilizia e titolare del contratto di fornitura), dovrebbero includere l'impegno a non alienare l'impianto per un periodo minimo di 12 anni, l'impegno a mantenere l'impianto negli migliori condizioni di esercizio e la disponibilità a un'eventuale raccolta dati per l'analisi delle prestazioni.

Alle domande, inoltre, dovrebbe essere allegato il progetto di definitivo (che include il preventivo di spesa) corredato di una scheda tecnica riassuntiva e, infine, l'eventuale autorizzazione/concessione a installare l'impianto.

### **L'erogazione del contributo**

Analogamente a quanto stabilito nel bando rivolto ai soggetti pubblici, per ciascun intervento relativo ai bandi regionali rivolti ai soggetti privati e pubblici, l'erogazione del contributo avverrà probabilmente in due fasi. Un acconto, pari a la 50%, dovrebbe essere erogato a valle del ricevimento, da parte delle Regioni o delle Province Autonome, della comunicazione di avvenuto inizio lavori (da effettuare, presumibilmente, entro 120 giorni dall'accoglimento della domanda). Il saldo dovrebbe essere invece erogato al termine dei lavori stessi (da effettuare, anch'esso presumibilmente, entro 240 giorni dall'accoglimento della domanda), a seguito della verifica della conformità e idoneità della documentazione a corredo dell'intervento realizzato. In particolare tale documentazione dovrebbe riguardare la certificazione di spesa, il verbale o la comunicazione di ultimazione lavori, la dichiarazione di conformità al progetto e alla legge 46/90 e la dichiarazione di verifica tecnico-funzionale.

## **DOMANDA DI CONTRIBUTO**

- **Conforme al modello predisposto**
- **Sottoscritta anche dal titolare del contratto di fornitura**
- **Dichiarazioni**
  - *divieto di alienare o dismettere l'impianto per un periodo minimo di 12 anni*
  - *impegno a mantenere l'impianto nelle migliori condizioni di esercizio e a fornirne i relativi dati*
- **Allegati**
  - *progetto definitivo (preventivo di spesa)*
  - *scheda tecnica di impianto*
  - *eventuale autorizzazione del proprietario*

Eventuali varianti dovrebbero essere motivate e integrate da idonea documentazione. L'approvazione delle varianti, comunque, non dovrebbe comportare l'aumento del contributo già concesso.

Istanze di proroga, debitamente motivate, dovrebbero essere inoltrate alle Regioni o Province Autonome, presumibilmente entro un termine stabilito dall'accoglimento della domanda.

Le Regioni o Province Autonome si dovrebbero riservare, infine, la facoltà di effettuare eventuali sopralluoghi in corso d'opera e verifiche tecniche nell'arco di vita dell'impianto.

## PROCEDURE E MODALITA'

- **Acconto: 50% a inizio lavori**
- **Saldo a seguito della verifica della documentazione inviata**
  - *consuntivo analitico della spesa sostenuta*
  - *certificazione di spesa (tecniche, materiali e posa in opera)*
  - *verbale/comunicazione di ultimazione lavori e certificato di regolare esecuzione*
  - *dichiarazioni di conformità al progetto, ai sensi della 46/90, attestato di verifica tecnico-funzionale e di collegamento alla rete, scheda "as built"*
- **Proroga (solo per il termine di ultimazione lavori)**
- **Varianti (escluso aumento del contributo)**
- **Eventuali verifiche e controlli (installazione, esercizio)**

### La specifica tecnica di fornitura

## SPECIFICA TECNICA

- **Caratteristiche di massima (array, cablaggio e quadri, sistema IT, inverter, contatore di energia e ore)**
- **Normativa e leggi di riferimento**
- **Dimensionamento, prestazioni e garanzia**
  - *energia producibile < consumo medio*
  - *potenza trasferibile in rete < potenza impegnata*
  - *efficienza impianto e inverter*
  - *garanzia impianto e moduli*
- **Verifica tecnico-funzionale**
  - *continuità elettrica, isolamento, messa a terra masse*
  - *corretto funzionamento impianto*
  - *caratterizzazione impianto*
- **Documentazione**
  - *progetto as-built, manuali, schede materiali, certificati di garanzia*

Fornisce le indicazioni di massima e di normativa da rispettare per la realizzazione di impianti fotovoltaici di taglia compresa tra 1 e 20 kW da collegare alla rete elettrica di distribuzione. In particolare la specifica richiama la normativa e le leggi di riferimento per la progettazione, il collegamento alla rete e l'esercizio di tali impianti, fornisce i criteri per il dimensionamento del sistema e indica le prestazioni minime

richieste in termini di efficienza del generatore fotovoltaico e dell'inverter.

Nella specifica tecnica vengono inoltre elencate le prove, misure e verifiche che dovrà effettuare l'installatore e la documentazione che dovrà essere emessa e rilasciata a lavori ultimati.

Infine viene indicato lo schema tipico di collegamento dell'impianto fotovoltaici alla rete elettrica di distribuzione

## AGGIORNAMENTO DELLA SPECIFICA TECNICA

- **Certificazione moduli e protezioni di interfaccia**
- **Garanzia componenti**
- **Decadimento prestazioni moduli**
- **Anno di fabbricazione moduli**
- **Scelta esposizione**
- **possibili configurazioni**
- **allacciamento alla rete**
- **semplificazione della verifica tecnico-funzionale**
- **modulistica per impianti fino a 6 kW**

### **La scheda tecnica dell'impianto**

In questa scheda vanno riportati i dati generali dell'impianto (richiedente, tipologia della struttura edilizia, superficie disponibile) e della rete elettrica a cui si collega (tensione, tipo di rete).

Vanno inoltre indicati i dati del generatore fotovoltaico (potenza

nominale, tensione e tipologia dei moduli) e dell'inverter (tipo, presenza o meno di protezioni di interfaccia). Infine deve essere indicata la tipologia dell'installazione (tetto, facciata o altro), l'esposizione dei moduli (angolo di tilt e angolo di azimut) e l'eventuale presenza di fenomeni di ombreggiamento.

## SCHEMA TECNICA IMPIANTO

- **Dati generali (richiedente, uso della struttura edilizia)**
- **Dati utenza elettrica (P, V, tipo, consumo)**
- **Generatore fotovoltaico (P<sub>nom</sub>, V, esposizione)**
- **Inverter (tipo, protezioni di interfaccia)**
- **Tipologia di installazione (integrazione o meno su copertura a falda, piana, facciata, tettoia, ecc.)**
- **Tecnologia moduli (mono, poli, amorfo, altro)**
- **Orientamento e inclinazione**
- **Fenomeni di ombreggiamento**
- **Insolazione e prestazioni attese**

### **Il riferimento normativo**

La realizzazione degli impianti fotovoltaici deve avvenire nel pieno rispetto della normativa vigente circa l'esecuzione delle opere civili ed elettriche.

Per quanto riguarda i regolamenti edilizi, l'impianto fotovoltaico può essere equiparato ad un impianto tecnologico installato, almeno in parte all'esterno dell'edificio.

## RIFERIMENTO NORMATIVO

**La realizzazione deve avvenire nel rispetto della normativa circa la realizzazione di opere civili e elettriche**

- **Regolamenti edilizi**
  - Silenzio assenso (legge 662/96)
  - Rilascio autorizzazione (aree soggette a vincoli)
- **Norme elettriche**
  - Sicurezza elettrica (CEI 64-8)
  - Collegamento alla rete (CEI 11-20)
    - Monofase/trifase
    - Assenza riferimenti interni
    - Protezioni
  - Inverter: armoniche e compatibilità e.m. (CEI 110-1,6,8)
  - Moduli fotovoltaici (CEI 82-2; omologazione del tipo)

E' ragionevole, pertanto, il ricorso alla procedura del silenzio assenso (legge 662/96). Nell'ipotesi invece di installazioni in aree soggette a vincoli paesaggistici, ambientali, ecc. sarà necessario il rilascio di idonea autorizzazione.

Per quanto riguarda invece le norme di carattere elettrico, la realizzazione degli impianti fotovoltaici è regolata dalle norme CEI. Più precisamente, devono essere rispettate le norme CEI 11-20 circa l'interfacciamento alla rete, le norme CEI 64-8 per quanto riguarda la sicurezza elettrica e le norme CEI 110-1 relativamente al contenuto di armoniche e alla compatibilità elettromagnetica dell'inverter.

### Regime fiscale e tariffario

Il regime fiscale dell'autoproduzione di energia elettrica a mezzo impianti fotovoltaici è regolamentato dalla legge 133/99. In particolare, per l'esercizio di impianti fino a 20 kW è prevista l'esenzione dagli obblighi di:

- pagamento delle imposte erariali e di consumo;
- denuncia di officina elettrica all'Ufficio Tecnico di Finanza per l'ottenimento della licenza di esercizio.

Per quanto riguarda il regime tariffario si

### REGIME FISCALE

- **D. L. .gs 504/1995 (art. 53 e seg.)**
  - **Denuncia di officina elettrica, licenza di esercizio e pagamento del diritto annuale**
  - **Misuratore fiscale e dichiarazione di consumo**
  - **Imposta erariale e relative addizionali sull'energia elettrica consumata**
- **Legge 133/1999 (art. 10)**
  - **L'esercizio di impianti da fonti rinnovabili di potenza elettrica non superiore a 20 kW, anche collegati alla rete, non è soggetto agli obblighi di cui al D. L.gs 504/95**
  - **L'energia elettrica consumata non è sottoposta a imposta**
  - **L'Autorità per l'energia e elettrica e il gas stabilisce le condizioni per lo scambio dell'energia**

distinguono tre casi:

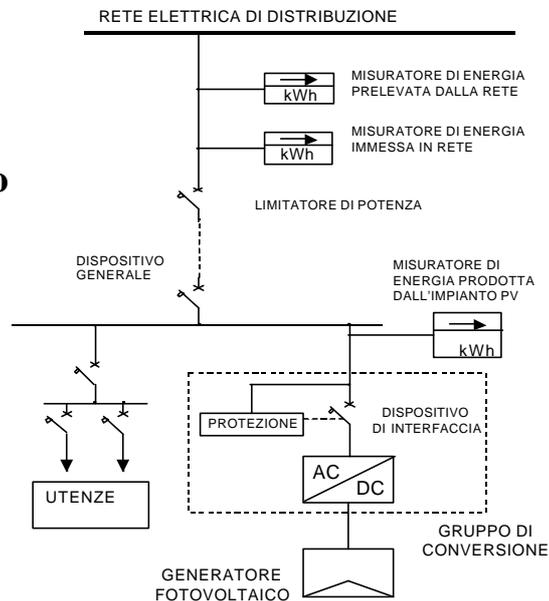
- assenza di immissione in rete. Dal punto di vista tecnico si verifica quando la potenza dell'utenza è in ogni istante superiore alla potenza erogata dall'impianto fotovoltaico. In questo caso non è necessario modificare il contratto di fornitura esistente.

### REGIME TARIFFARIO

- **Nessuna immissione di energia in rete**
- **Cessione di tutta l'energia prodotta (Deliberazione 81/99)**
- **Scambio sul posto (Deliberazione 224/2000):**
  - *su base annuale, senza applicazione di fasce orarie*
  - *saldo positivo a credito per gli anni successivi*
  - *trattamento previsto dal contratto di fornitura sul saldo negativo*
  - *complessi di misura forniti, installati e mantenuti dal gestore della rete*
  - *corrispettivo per servizio di misura: 60.000 lire/anno*

## DELIBERAZIONE n. 224/00

- **Condizioni tecnico-economiche del servizio di scambio sul posto dell'energia**
- **Risposta del gestore della rete entro 30 giorni**
- **Schema di contratto tipo**
- **Compensazione dell'energia su base annuale**



- cessione al Distributore di tutta l'energia prodotta dall'impianto. I prezzi di cessione dell'energia elettrica sono regolati dalla Deliberazione 81/1999 dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas.
- scambio dell'energia con il Distributore. Le condizioni tecnico-economiche del servizio di scambio sono definite dalla Deliberazione 224/2000 dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas. In sintesi:
  - lo scambio è effettuato su base annuale;
  - se il saldo è positivo viene riportato a credito per gli anni successivi, se negativo si applica il trattamento previsto dal contratto di fornitura;
  - i contatori sono installati dal distributore e il corrispettivo per il servizio di misura è 60.000 lire/a

### Il ruolo dell'ENEA nel Programma

l'ENEA, essendo l'unico organismo pubblico con competenze specifiche e "super partes", ha svolto in passato, nell'ambito di un

## FASE DI AVVIO

- **Attività generali**
  - *Emissione delle specifiche tecniche di riferimento*
  - *Sito internet e database*
  - *Valutazione dei progetti e partecipazione all'esame delle domande*
  - *Svolgimento di campagne informative e di attività di formazione*
  - *Monitoraggio e reporting dell'iniziativa*
- **Attività sperimentali**
  - *Raccolta e analisi dei dati*
  - *Ricerca, sviluppo e sperimentazione su componenti e sistemi fotovoltaici per la generazione distribuita (integrazione del generatore PV)*

Accordo di Programma con il Ministero dell'Industria, una serie di azioni propedeutiche all'avvio dell'iniziativa che hanno portato alla:

- eliminazione delle barriere tecniche e non tecniche che avrebbero ostacolato la diffusione di impianti fotovoltaici di piccola taglia connessi alla rete;
- coinvolgimento dei gestori della rete a cui si allacciano gli impianti;

## SITO INTERNET E DATABASE

- **Attivazione di un sito dedicato per informazioni sul Programma ([www.tetti-fotovoltaici.org](http://www.tetti-fotovoltaici.org))**
- **Realizzazione di un database interrogabile per:**
  - *seguire l'istruttoria delle domande*
  - *seguire le fasi realizzative dei progetti*
  - *elaborare i dati di progetto e di funzionamento degli impianti*
  - *ottenere valutazioni statistiche sull'andamento dell'iniziativa, sulla componentistica adottata, sui costi, ecc.*

- sviluppo e sperimentazione, in collaborazione con l'industria, di componenti dedicati (tegole fotovoltaiche, moduli per facciate, inverter);
- definizione delle linee guida per l'attuazione del Programma
- diffusione della tecnologia attraverso la realizzazione di impianti pilota presso le principali Università e

Comuni. Tali impianti, mediamente di potenza pari a 2.5 kW, sono stati realizzati anche con l'intento di provare nuovi componenti e soluzioni progettuali, sperimentare l'integrazione in tetti e facciate e, infine, mettere a punto la rete di telemonitoraggio.

Sinn dalla fase di avvio del Programma, l'ENEA, nell'ambito di un Atto Integrativo all'Accordo di Programma con il Ministero dell'Ambiente, ha fornito al ministero il supporto tecnico specialistico necessario al corretto ed efficace svolgimento dell'iniziativa partecipando alla preparazione dei bandi, emanando le specifiche tecniche di riferimento e allestendo un sito

## RACCOLTA E ANALISI DATI

- **Rilevamento dell'energia prodotta, dei flussi di energia e delle ore di funzionamento**
- **Correlazione delle informazioni raccolte con i dati meteorologici locali, interpretazione dei risultati**
- **Selezione degli impianti più significativi ed elaborazione di dettaglio dei relativi dati di esercizio**
- **Produzione di rapporti tecnici sulle prestazioni degli impianti**

internet e un data base. Il sito internet ([www.tetti-fotovoltaici.org](http://www.tetti-fotovoltaici.org)) fornisce informazioni sul Programma mentre il data base consente di seguire l'istruttoria delle domande e le fasi realizzative dei progetti e di elaborare i dati di progetto e di funzionamento degli impianti. L'ENEA, inoltre,

partecipa all'esame delle domande e alla valutazione dei progetti e svolge campagne informative e attività di formazione. In particolare, le attività di formazione riguardano l'attivazione di moduli rivolti sia agli installatori sia ai progettisti e la predisposizione di materiale didattico. Infine l'ENEA svolge una adeguata attività sperimentale di accompagnamento

## CORSI E ATTIVITA' INFORMATIVE

- **Formazione**
  - *attivazione di 20 corsi rivolti ai progettisti (100) e agli installatori (500)*
  - *predisposizione di materiale didattico su carta, videocassetta e CD-ROM*
- **Informazione**
  - *servizio di numero verde*
  - *veicolazione di opuscoli mirati e divulgativi attraverso riviste di settore e a larga diffusione rispettivamente*

e supporto al programma, eseguirà la raccolta e l'analisi dei dati di funzionamento degli impianti e, in generale, effettuerà il monitoring e il reporting dell'iniziativa.

## SUPPORTO SPERIMENTALE

**L'insieme delle attività sperimentali di accompagnamento al Programma è incentrato sui componenti e sistemi, con l'obiettivo di incrementare le competenze e mettere a punto procedure di prove, per:**

- **moduli**
  - *misure specifiche (ottiche, elettriche, meccaniche, termiche)*
  - *prove invecchiamento (cicli termici e esposizione alla radiazione UV)*
- **inverter**
  - *prove di caratterizzazione e prove di tipo*
  - *analisi delle problematiche e delle possibili soluzioni (esperienze all'estero / componenti reperibili in commercio)*
  - *sperimentazione di protezioni di interfaccia*
  - *Sviluppo di nuovi prodotti*

## INDICE

	<b>Pag.</b>
<b>I DISPOSITIVI FOTOVOLTAICI</b>	
La cella fotovoltaica	2
L'efficienza della cella	3
Le caratteristiche elettriche della cella	4
La tecnologia del silicio	5
La fabbricazione della cella	6
Le celle commerciali	7
La fabbricazione del modulo	7
I moduli commerciali	8
Le nuove tecnologie	8
I film sottili	9
La fabbricazione di moduli al silicio amorfo	9
Il pay-back time	10
L'efficienza dei moduli	11
La produzione dei moduli	11
Previsioni di mercato	13
Ripartizione del mercato per tecnologia	13
L'evoluzione dei prezzi	14
La curva di apprendimento	15
La ripartizione dei costi	15
La riduzione del costo	15
Conclusioni	16
<b>GLI IMPIANTI</b>	
L'impianto fotovoltaico	17
Il generatore fotovoltaico	17
Il sistema di condizionamento della potenza	17
Gli impianti isolati	18
Gli impianti collegati alla rete	19
Le caratteristiche degli impianti fotovoltaici	20
L'impatto ambientale	21
Il risparmio di combustibile	22

<b>L'impatto sul territorio</b>	<b>24</b>
<b>Il fotovoltaici e l'architettura</b>	<b>25</b>
<b>La potenza installata nel mondo</b>	<b>28</b>
<b>La potenza installata in Italia</b>	<b>30</b>
<b>La generazione diffusa</b>	<b>32</b>
<b>LA PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI</b>	
<b>La progettazione di un impianto fotovoltaico</b>	<b>34</b>
<b>L'energia raccolta dai moduli fotovoltaici</b>	<b>34</b>
<b>La radiazione solare al suolo</b>	<b>35</b>
<b>Le orbite solari</b>	<b>36</b>
<b>Le curve isoradiative</b>	<b>37</b>
<b>La radiazione su superficie inclinata</b>	<b>37</b>
<b>L'influenza dell'angolo di azimut</b>	<b>42</b>
<b>L'effetto della temperatura</b>	<b>42</b>
<b>L'effetto del vetro di copertura</b>	<b>43</b>
<b>La configurazione a file parallele</b>	<b>43</b>
<b>La scelta dell'angolo di tilt</b>	<b>44</b>
<b>L'energia raccolta su superficie inclinata</b>	<b>45</b>
<b>Le utenze domestiche</b>	<b>45</b>
<b>La configurazione dell'impianto</b>	<b>46</b>
<b>I componenti del generatore fotovoltaico</b>	<b>47</b>
<b>L'inverter</b>	<b>48</b>
<b>Gli impianti collegati alla rete</b>	<b>50</b>
<b>Gli impianti isolati</b>	<b>51</b>
<b>GLI ASPETTI ECONOMICI</b>	
<b>Il costo degli impianti fotovoltaici</b>	<b>52</b>
<b>Il costo del kWh</b>	<b>53</b>
<b>Il valore aggiunto del fotovoltaico</b>	<b>54</b>
<b>IL PROGRAMMA "TETTI FOTOVOLTAICI"</b>	
<b>I programmi nazionali</b>	<b>56</b>
<b>Il programma italiano "tetti fotovoltaici"</b>	<b>58</b>
<b>Il sottoprogramma rivolto ai soggetti pubblici</b>	<b>58</b>
<b>Il sottoprogramma rivolto ai soggetti privati e pubblici</b>	<b>60</b>
<b>Il sottoprogramma interventi fotovoltaici ad alta valenza architettonica</b>	<b>62</b>
<b>La domanda di contributo</b>	<b>63</b>
<b>L'erogazione del contributo</b>	<b>63</b>
<b>La specifica tecnica di fornitura</b>	<b>64</b>
<b>La scheda tecnica dell'impianto</b>	<b>65</b>
<b>Il riferimento normativo</b>	<b>65</b>
<b>Regime fiscale e tariffario</b>	<b>66</b>
<b>Il ruolo dell'ENEA nel Programma</b>	<b>67</b>

## Bibliografia

### Testi

- F.P. Vivoli **"Energia elettrica dal sole."** ENEA-ISES, 1998
- M. Spagnolo, F.P. Vivoli. **"L'integrazione dei sistemi fotovoltaici nell'edilizia e nelle infrastrutture urbane"** ENEA-ISES 1999
- Califano, Silvestrini, Vitale **"La progettazione dei sistemi fotovoltaici"** Liguori, Napoli 1988
- F. Groppi, C. Zuccaro **"Impianti solari fotovoltaici a norme CEI"** UTET, 2000
- N. Aste **"Il fotovoltaico in architettura"**, Esselibri, 2002
- W. Palz **"Atlante europeo della radiazione solare."** Verlag TUV Rheinland, 1985
- S. Tetrarca, E. Cogliani, F. Spinelli **"La radiazione solare globale al suolo in Italia."** ENEA, 2000
- Gallo, Cianciullo **"Costruire con il sole"** ISES Italia, Roma febbraio 1996
- Cucumo, Marinelli, Oliveti **"Ingegneria Solare"** Pitagora ed., Bologna 1994
- Marco Sala, Lucia Ceccherini Nelli **"Tecnologie Solari"** Alinea, Firenze 1993
- Martinis B. **"L'energia in Italia - Convenzionale, nucleare o alternativa?"** Ed Dedalo, Bari 1990
- De Sivo, Fumo **"L'architettura dell'energia. Fondamenti e prospettive."** CUEN, Napoli 1987

### Articoli e Relazioni

- Proceedings della XVII Conferenza Europea sul Fotovoltaico, Monaco 22-26 Ottobre 01
- FOTOVOLTAICI FV**, Artech Publishing, artt. vari
- ILSOLEATRECENTOESSANTAGRADI**, Bollettino ISES Italia, artt. vari
- Macchiaroli **"Il sistema fotovoltaico - Una alternativa all'allacciamento tradizionale per utenze particolari."** HTE n.99 Gennaio-Febbraio 1996
- Connolly **"Verso una cella solare ad alto rendimento."** HTE n.100, marzo-aprile 1996
- Vigotti, Rossi **"Produzione di energia elettrica da fonte fotovoltaica."** HTE n.100, marzo-aprile 1996
- Menna **"Il contributo delle fonti rinnovabili in Italia."** ENEA, 1996
- S. Li Causi, S. Castello **"Principi e tecnologia del fotovoltaico"** Le Scienze (quaderni) Giugno 1997
- Coiante **"Combustibili alternativi da fonte rinnovabile: l'idrogeno."** HTE n.95, maggio-giugno 1995
- Garozzo **"Le iniziative dell'ENEA per le energie rinnovabili."** HTE n.90, luglio-agosto 1994
- Ariemma, Caridi, Cipriani **"Applicazioni fotovoltaiche nel settore residenziale"** HTE n.87, gennaio-febbraio 1994
- SCHUCO International **"Facciate fotovoltaiche. Realizzazione di facciate e produzione di energia con elementi fotovoltaici."**

## SITI WEB

[www.enea.it](http://www.enea.it)  
[www.tetti-fotovoltaici.org](http://www.tetti-fotovoltaici.org)  
[www.minambiente.it](http://www.minambiente.it)  
[www.isesitalia.it](http://www.isesitalia.it)  
[www.pvportal.com](http://www.pvportal.com)  
[www.pvdatabase.com](http://www.pvdatabase.com)  
[www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org)  
[www.task2.org](http://www.task2.org)

# RIFERIMENTI DISCIPLINARI

## ELETTRONICA

Giunzione P.N. e cella fotovoltaica  
(caratteristiche elettriche, circuito equivalente,  
parametri)  
Inverter  
DC/DC Converter  
Regolatori di carica di batterie

## TECNOLOGIE ELETTRONICHE

La tecnologia del silicio  
La tecnologia a film sottile  
Processi di realizzazione di celle e  
moduli.  
I prodotti commerciali

## ELETTROTECNICA

Impianti elettrici (cc,ca, M.T.)  
Quadri elettrici  
Interfacciamento alla rete  
elettrica  
Normativa tecnica  
Sistemi di accumulo  
UtENZE elettriche

## MISURE ELETTRICHE

Caratterizzazione di celle e moduli PV  
Misura di grandezze elettriche e meteo  
Contabilizzazione dell'energia  
Sensori e convertitori

## FISICA

Semiconduttori e teoria della giunzione  
La radiazione solare (componenti, orbite  
solari, dati meteorologici)  
Calcolo dell'energia incidente sui moduli  
Bilanci energetici  
Effetti termici e ottici

## TECNICA DELLE COSTRUZIONI

Strutture di supporto moduli fotovoltaici  
Analisi dei carichi e verifica statica  
Normativa di riferimento.  
Integrazione architettonica  
Elaborati grafici

## ECONOMIA AZIENDALE

La produzione e le previsioni di  
mercato  
I prezzi e la ripartizione dei costi  
Il costo dell'energia  
Il valore aggiunto  
I programmi di incentivazione

## INFORMATICA

Sistemi di acquisizione dati  
Banche Dati  
Software per l'acquisizione e l'elaborazione dati  
Software per il dimensionamento degli impianti

## EDUCAZIONE AMBIENTALE

Le caratteristiche del fotovoltaico  
Le applicazioni  
L'impatto ambientale e sul territorio  
Il risparmio di combustibile  
La generazione diffusa