



Gli Impianti Fotovoltaici: energia dal Sole

La tecnologia solare fotovoltaica

E' la tecnologia che permette la trasformazione diretta di energia solare in energia elettrica.

- Assenza di emissioni inquinanti durante il funzionamento (emissioni evitate: 0,5÷ 0,7 kg di CO₂ per kWh prodotto)
- Risparmio di combustibili fossili
- Affidabilità degli impianti poiché non hanno parti in movimento
- Costi di esercizio e manutenzione ridotti al minimo



L'elemento base: la cella FV



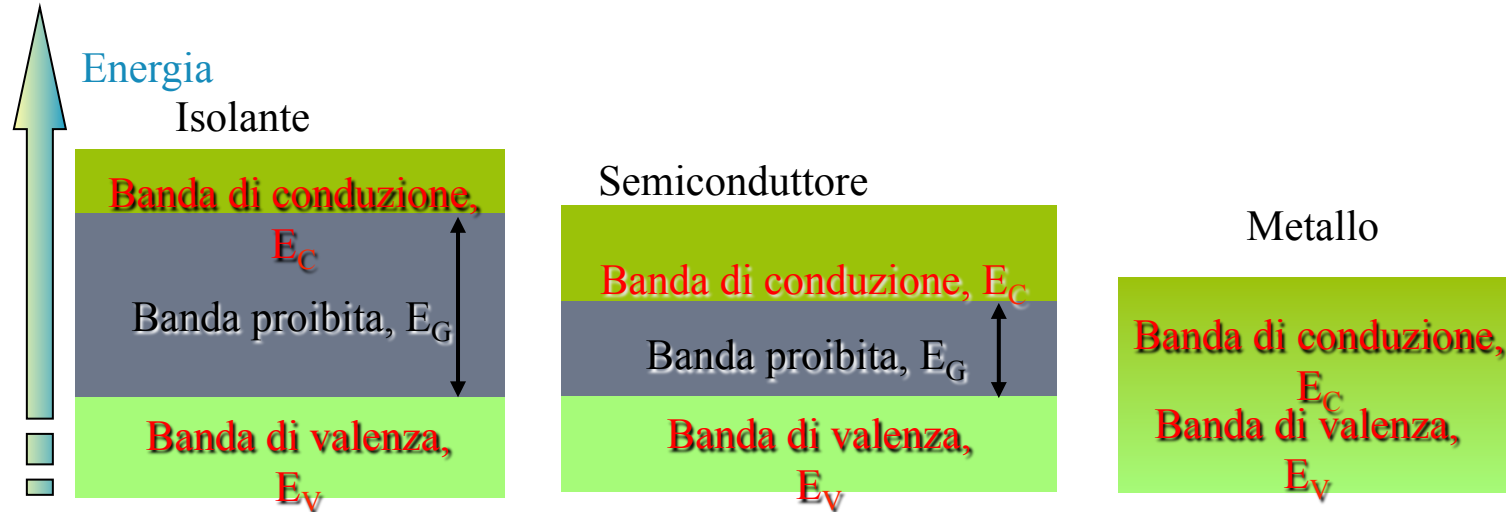


Effetto Fotovoltaico

L'effetto fotovoltaico consiste nell'utilizzare i fotoni di luce solare per promuovere gli elettroni degli atomi di un materiale dalla banda di valenza a quella di conducibilità; tali elettroni in presenza di una f.e.m si muovono in modo organizzato realizzando una corrente elettrica.

L'utilizzo di materiali semiconduttori permette di abbassare la soglia energetica esistente tra la banda di valenza e quella di conducibilità per cui è possibile ottenere, a parità di radiazione incidente, una quantità maggiore di corrente elettrica.

Conduzione elettrica nei materiali



- **Isolanti**

- Banda di conduzione e di valenza separate da una **banda proibita troppo elevata** **improbabile la conduzione elettrica**

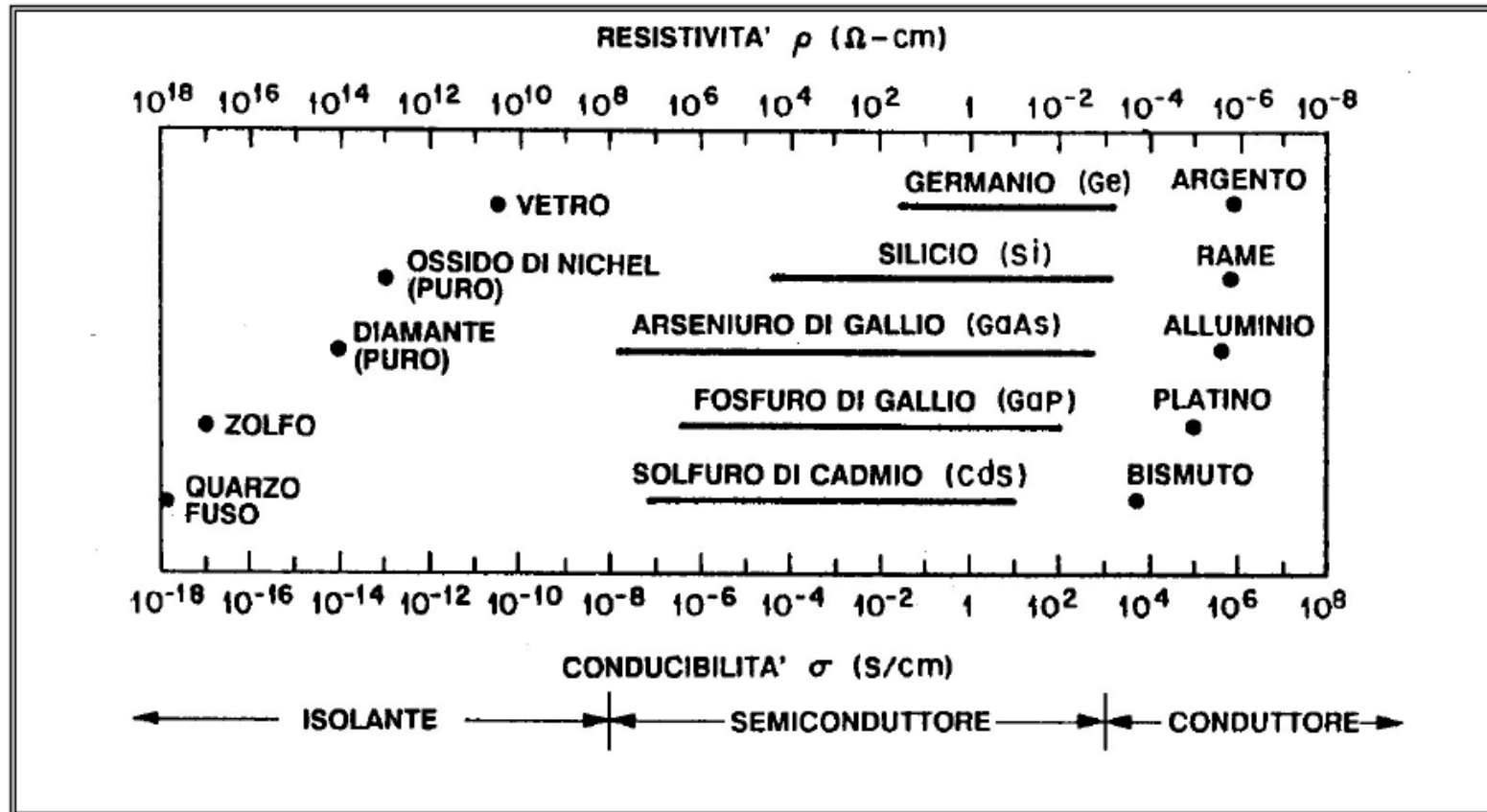
- **Semiconduttori**

- Banda di conduzione e di valenza **separate** da un' **energia di gap** (stati energeticamente non permessi)
- La banda proibita è **piccola** e può essere **superata tramite l'assistenza della temperatura**
- Conducibilità elettrica **crescente** con la **temperatura**

- **Metalli**

- Banda di conduzione e di valenza **sovrapposte** quindi **nube di elettroni liberi**
- Conducibilità elettrica **decrescente** con la **temperatura** (scattering fra elettroni)

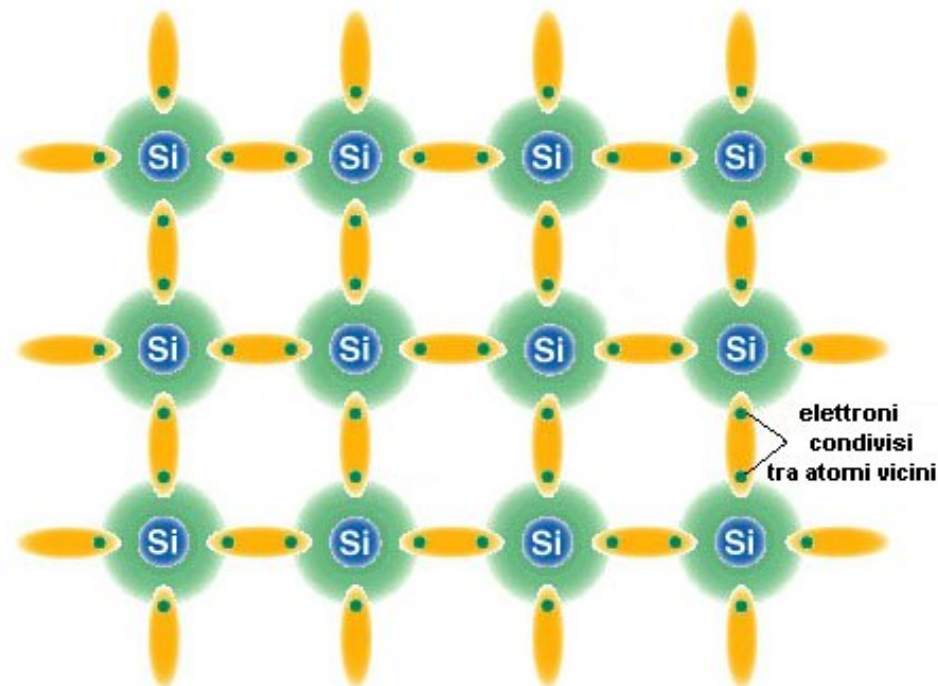
Materiali Semiconduttori



Effetto fotovoltaico

L'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali sono elettroni di valenza, che quindi possono partecipare alle interazioni con altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi.

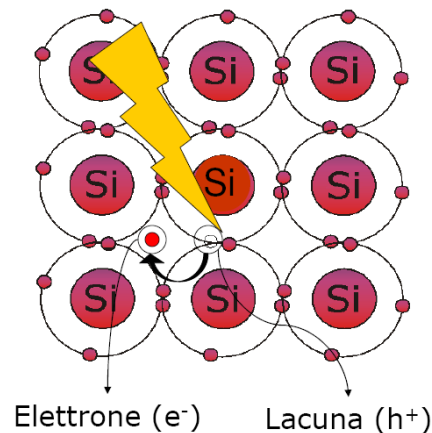
In un cristallo di silicio puro ogni atomo è legato in modo covalente ad altri quattro atomi: quindi due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro hanno in comune una coppia di elettroni.



Effetto fotovoltaico

Esiste un forte legame elettrostatico fra un elettrone e i due atomi che esso contribuisce a tenere uniti. Questo legame elettrostatico può essere spezzato con una quantità di energia che permetta ad un elettrone di passare ad un livello energetico superiore, cioè dalla banda di valenza alla banda di conduzione, superando la banda proibita.

Se l'energia fornita è sufficiente l'elettrone viene portato ad un livello energetico superiore (banda di conduzione), dove è libero di spostarsi, contribuendo così al flusso di elettricità lasciandosi dietro una lacuna.



Effetto fotovoltaico

Un elettrone vicino può andare a riempire la lacuna, scambiando così di posto.

Quando un flusso luminoso investe il reticolo cristallino del silicio, si ha la liberazione di un certo numero di elettroni al quale corrisponde un egual numero di lacune. Nel processo di ricombinazione ogni elettrone che capita in prossimità di una lacuna la può occupare, restituendo una parte dell'energia cinetica che possedeva sotto forma di calore.

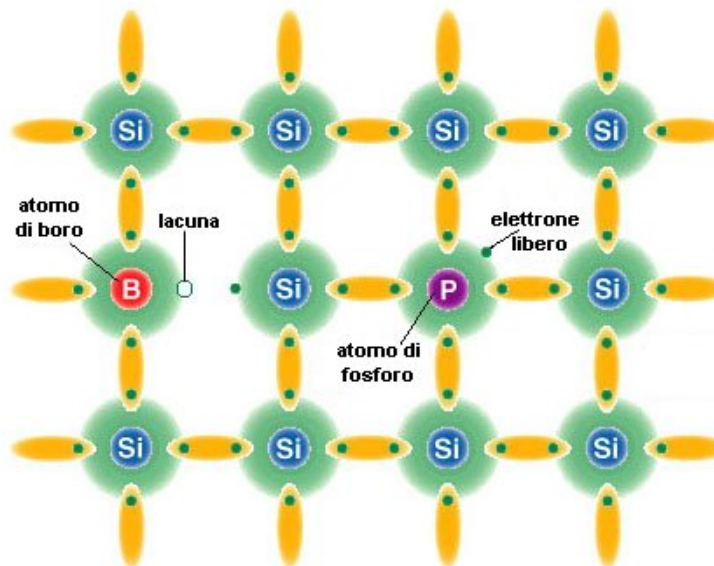
N.B. In un semiconduttore **Intrinseco** vi è lo stesso numero di elettroni e lacune, perciò il materiale è neutro.

Per sfruttare l'elettricità è necessario creare un moto coerente di elettroni (e di lacune), ovvero una corrente, mediante un campo elettrico interno alla cella. Il campo si realizza con particolari trattamenti fisici e chimici, creando un eccesso di atomi caricati positivamente in una parte del semiconduttore ed un eccesso di atomi caricati negativamente nell'altro.

Effetto fotovoltaico

Nel silicio viene introdotta una piccola quantità (dell'ordine di una parte per milione) di atomi (**drogaggio**), in modo da ottenere due strutture differenti, una con un numero di elettroni insufficiente, l'altra con un numero di elettroni eccessivo.

Generalmente si utilizzano il **boro** (terzo gruppo) ed il **fosforo** (quinto gruppo) per ottenere rispettivamente una struttura di tipo **p** (con un eccesso di lacune) ed una di tipo **n** (con un eccesso di elettroni).



Effetto fotovoltaico

Nello strato drogato con fosforo, che ha cinque elettroni esterni o di valenza contro i quattro del silicio, è presente una carica negativa debolmente legata, composta da un elettrone per ogni atomo di fosforo. Analogamente, nello strato drogato con boro, che ha tre elettroni esterni, si determina una carica positiva in eccesso, composta dalle lacune presenti negli atomi di boro quando si legano al silicio.

Il primo strato, a carica negativa, si indica con n, l'altro, a carica positiva, con p, la zona di separazione è detta

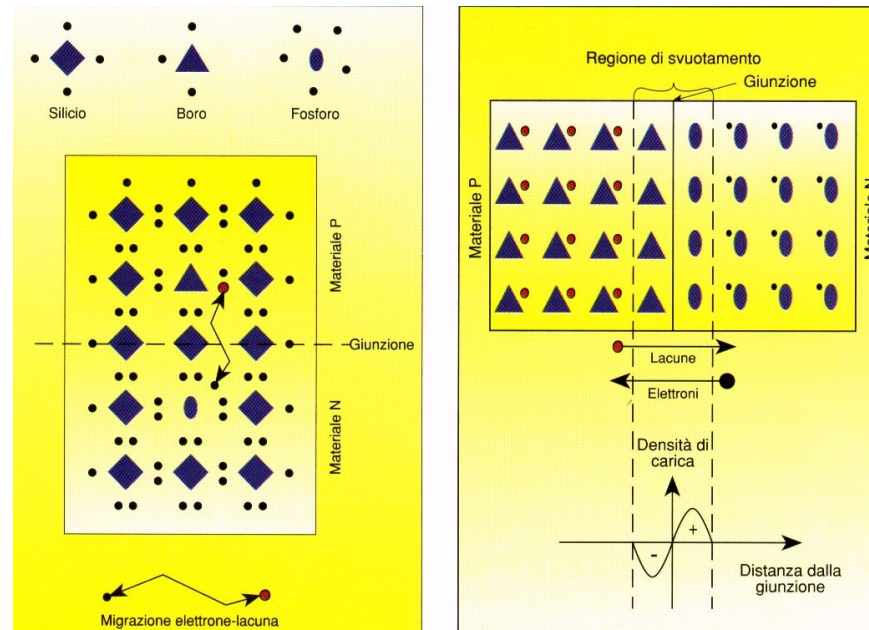
giunzione p-n

Nella giunzione p-n la corrente passa solo in un verso e non nel verso opposto.

Effetto fotovoltaico

Ponendo a contatto i due tipi di strutture, tra i due strati si attiva un flusso elettronico dalla **zona n** alla **zona p** che, raggiunto il punto di equilibrio elettrostatico, determina un eccesso di carica positiva nella zona n, dovuto agli atomi di fosforo con un elettrone in meno, e un eccesso di carica negativa nella zona p, dovuto agli elettroni migrati dalla zona n.

Il risultato è un campo elettrico interno al dispositivo dell'ampiezza di pochi micrometri.





Effetto fotovoltaico

Quando un fotone di luce solare colpisce la cella fotovoltaica, può esserne assorbito, riflesso o può attraversarla; delle tre la prima ipotesi è quella che ci interessa per l' elettrogenazione.

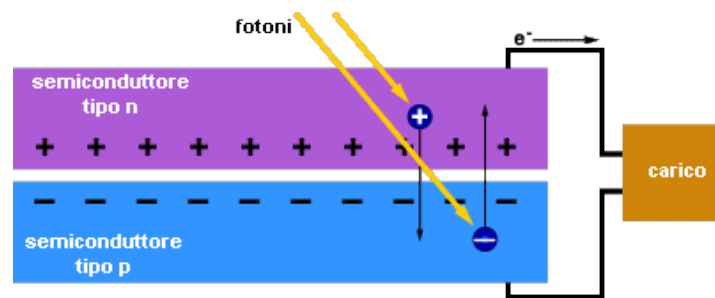
Se il fotone trasporta una quantità di energia sufficiente, è in grado di promuovere un elettrone spingendolo nella banda di conducibilità; le coppie **elettrone-lacuna** così generate, possono o meno ricadere sotto l' influenza del campo elettrico.

Se questo processo avviene vicino alla barriera di potenziale (prima ipotesi), questa separa le cariche, che fluiscono ai contatti esterni costituendo una corrente elettrica.

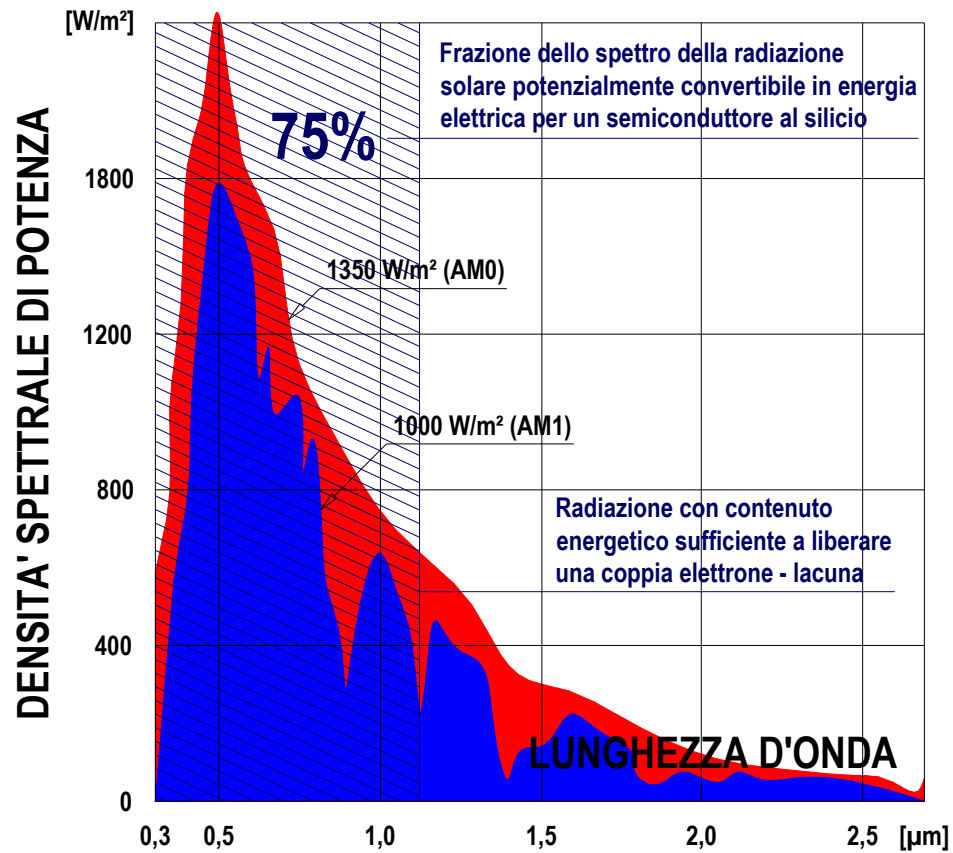
Nella seconda ipotesi, le coppie elettrone-lacuna vagano casualmente nella struttura cristallina fino a ricomporsi con un' altra carica di segno opposto

Effetto fotovoltaico

Quindi, se si connette la **giunzione p-n** con un conduttore, nel circuito esterno si otterrà un **flusso di elettroni** che parte dallo strato n, a potenziale maggiore, verso lo strato p, a potenziale minore. E' importante che lo spessore dello strato n sia tale da garantire il massimo assorbimento di fotoni incidenti in vicinanza della giunzione. Per il silicio questo spessore deve essere di 0,5 mm, mentre lo spessore totale della cella non deve superare i 250 mm.



Effetto Fotovoltaico



La percentuale di energia solare che teoricamente possibile convertire in energia elettrica non supera il 44%

La rimanente parte, pari al 56%, è trasformato in calore

Rendimento di cella

- Nella cella fotovoltaica viene sfruttata solo una parte della radiazione solare incidente, dipendente dalle caratteristiche del materiale di cui è costituita la cella stessa.
- L'efficienza di conversione, ovvero la percentuale di energia luminosa convertita in energia elettrica, per celle commerciali al Silicio (semiconduttore comunemente utilizzato per la produzione di celle solari) è in genere compresa tra il 12% e il 17%.
- Per celle di laboratorio in fase di sperimentazione si possono raggiungere rendimenti anche del 35% (i costi sono però proibitivi).

Potenza utile e superfici necessarie

- La costante solare (ovvero la potenza per metro quadrato di superficie che raggiunge la terra in condizioni standard) vale $C=1000 \text{ W/m}^2$:

$$P_s=1000 \text{ W/m}^2$$

$$\eta=12\%$$

$$P_u=120 \text{ W/m}^2$$

$$S(1\text{kW}_p)=8.33 \text{ m}^2$$

- Il simbolo p sta per potenza di picco ovvero la potenza massima prodotta da un dispositivo fotovoltaico in condizioni standard di funzionamento (irraggiamento 1000 W/m^2 e temperatura 25°C).
- Sono necessari 8 metri quadrati di superficie per produrre 1000 W_p di energia elettrica



Energia utile disponibile

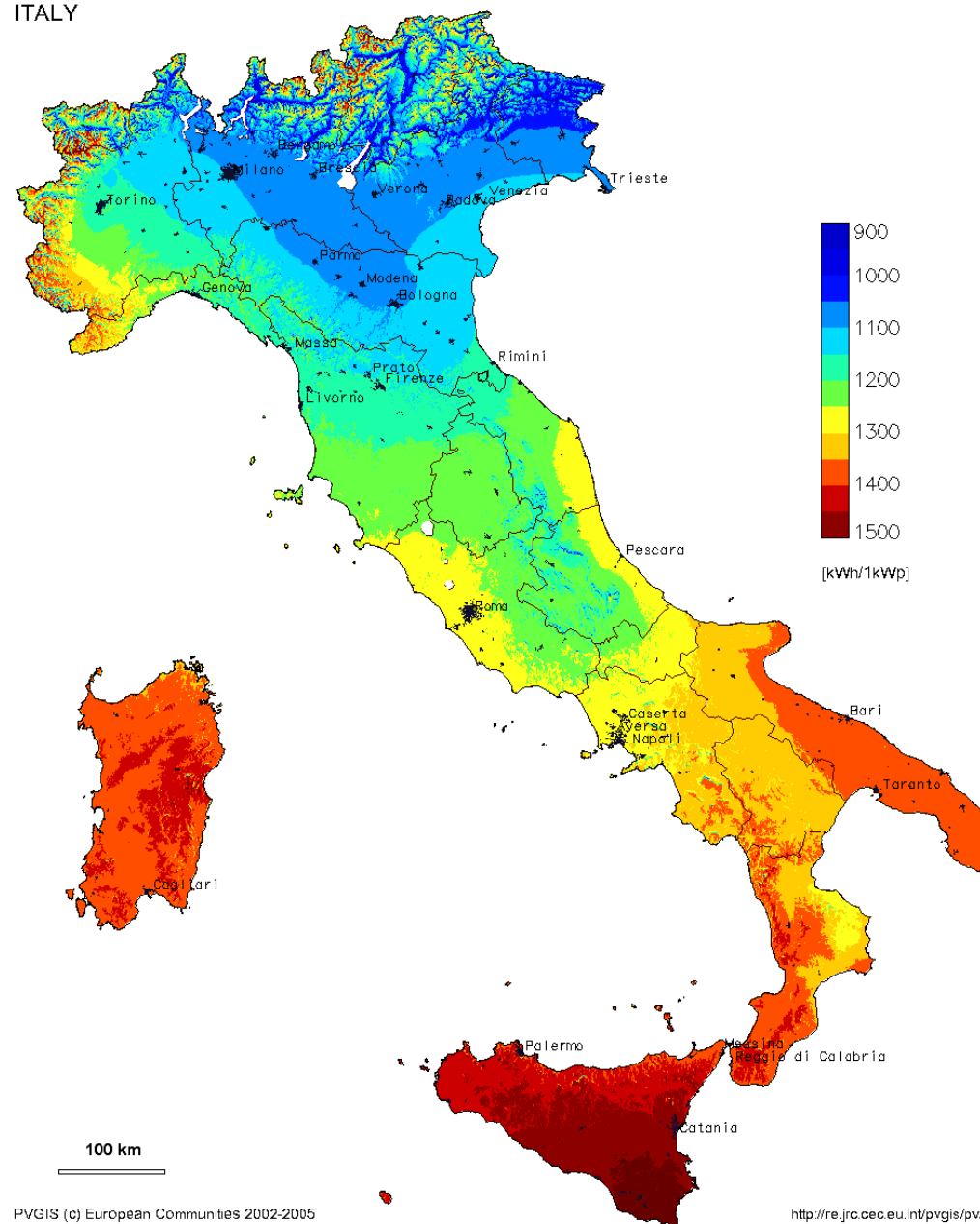
- E' chiaro che il kWp ha un significato istantaneo ovvero il massimo di potenza elettrica che la cella o meglio il pannello PV è in grado di rendere disponibile.
- Durante l'arco dell'anno l'irraggiamento solare è variabile in quantità e dipende anche dalla posizione reciproca del pannello (del campo PV) rispetto all'inclinazione del Sole che sappiamo variabile in dipendenza della stagione.
- Si possono sviluppare diversi conti che tengano conto dello storico delle diverse regioni per quanto riguarda l'insolazione ma in generale per l'Italia si possono desumere le seguenti cifre.

Energia utile disponibile (Italia)

| Regione | Energia (kWh/ anno per kWp installato) |
|----------------|---|
| Nord | 1200 |
| Centro | 1350 |
| Sud | 1500 |

Potenziale Fotovoltaico

ITALY



Tecnologia e tipi di celle PV

Attualmente, esistono i seguenti tipi di celle:

- Si Policristallino: il wafer non è strutturalmente omogeneo ma organizzato in grani localmente ordinati
- Si Monocristallino: ogni cella è realizzata a partire da un wafer la cui struttura cristallina è omogenea

FILM SOTTILE

- Si Amorfo: in cui gli atomi silicei vengono depositi chimicamente in forma amorfa, ovvero strutturalmente disorganizzata, sulla superficie di sostegno. Questa tecnologia impiega quantità molto esigue di silicio.
- CIS (Diseleniuro di rame e indio)
- CIGS (Diselenuro di rame indio gallio)
- CTS (Tellururo di Cadmio e Solfuro di Cadmio)
- Arseniuro di Gallio



Tecnologia e tipi di celle PV

La maggior parte delle celle fotovoltaiche attualmente in commercio è costituita da semiconduttori in silicio per i seguenti motivi:

- Disponibilità pressoché illimitata (risorse del pianeta)
- Largo utilizzo nell'industria elettronica (processi tecnologici di raffinazione, lavorazione e drogaggio ben affinati)
- Possibilità di riciclare gli scarti dell'industria elettronica in quanto l'industria fotovoltaica tollera concentrazioni di impurità tipicamente di $10^{-5} \div 10^{-6}$ (contro i valori di $10^{-8} \div 10^{-9}$ relativi all'industria elettronica)

Tipologie di celle fotovoltaiche

Celle al silicio monocristallino

- **Gemmazione e crescita cristallina** - Il silicio a cristallo singolo è ottenuto da un processo detto *melting* a partire da cristalli di silicio di elevata purezza che, una volta fusi, vengono fatti solidificare a contatto con un seme di cristallo. Il silicio solidifica nella forma di un lingotto cilindrico costituito da un unico cristallo del diametro di 13 ÷ 20cm e lunghezza di circa 200cm;
- **Taglio** – Il lingotto viene “affettato” con particolari seghe in *wafers* con spessore di 250 ÷ 350µm (spinto sfruttamento del lingotto contro un’ estrema fragilità dei wafers)

$$\eta \approx 13.5\%$$

Tipologie di celle fotovoltaiche

Celle al silicio policristallino

$\eta \approx 9.0\%$

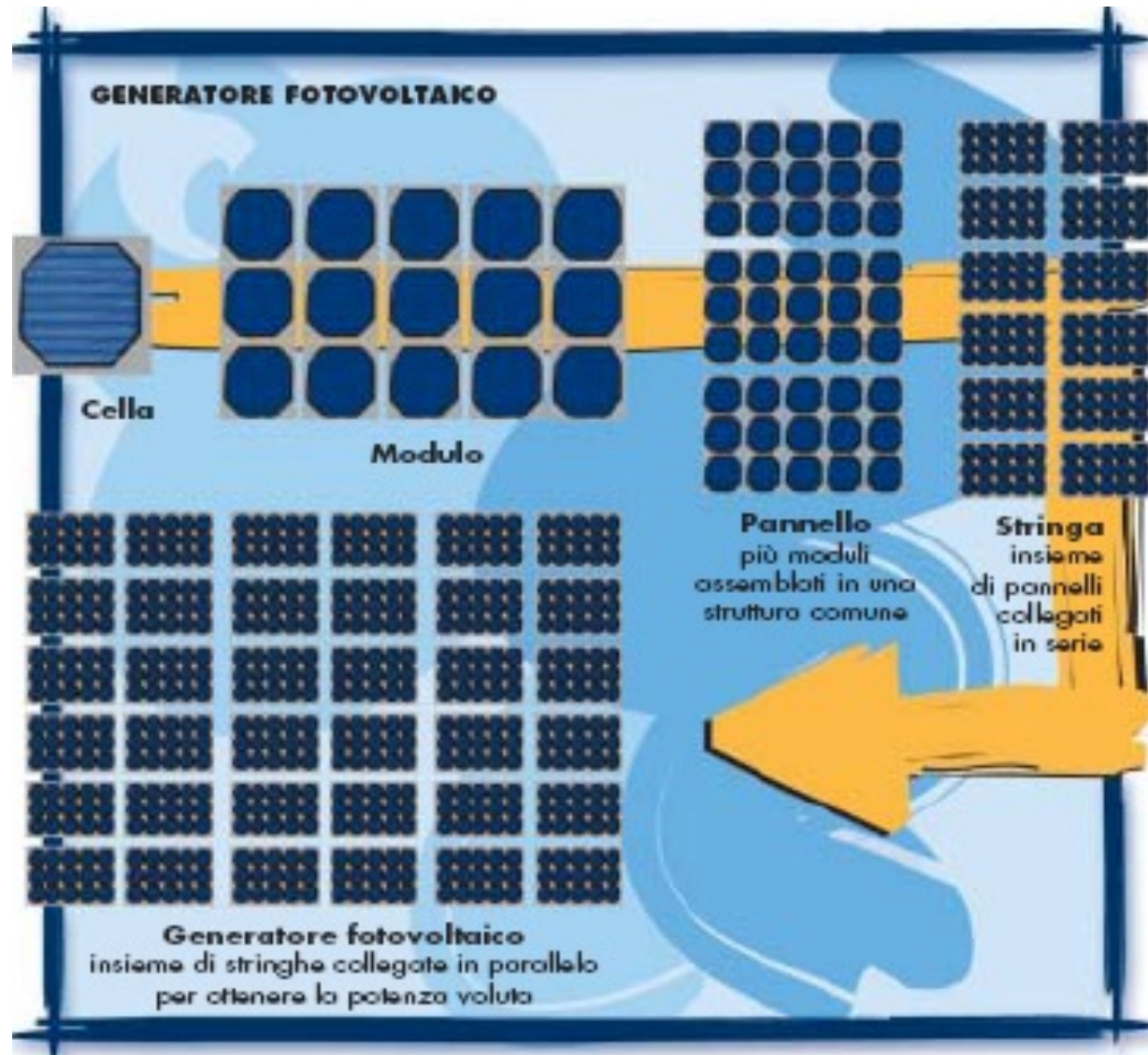
- **Forma** - Il silicio policristallino è caratterizzato dalla presenza di più cristalli aggregati fra di loro con forme, dimensioni ed orientamenti differenti;
- **Costi contenuti** – (rispetto al silicio monocristallino)

Celle al silicio amorfo

$\eta \approx 6.0\%$

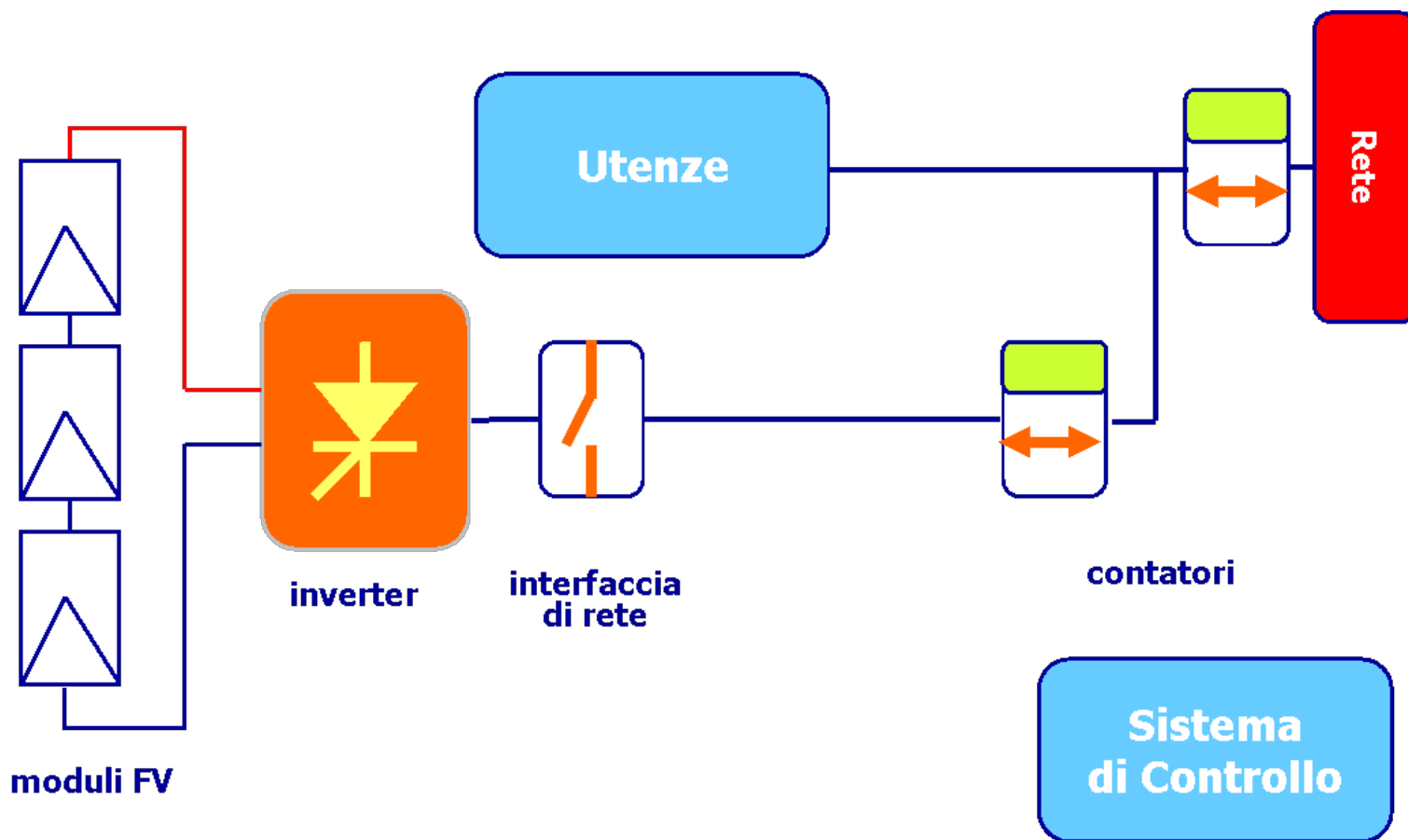
- **Forma** – Il semiconduttore, sotto forma di gas, è depositato in strati dell'ordine di $10\mu\text{m}$ su qualsiasi superficie (tecnica dei *film sottili*);
- **Tecnica della giunzione multipla** – Con il drogaggio differente di vari strati di silicio collegati in serie si ottengono celle con diverse sensibilità allo spettro solare. Il risultato si traduce in un maggior rendimento e resa energetica;
- **Costi contenuti** – (rispetto al silicio policristallino)
fragilità dei wafers)

Il modulo Fotovoltaico



I componenti principali di un impianto

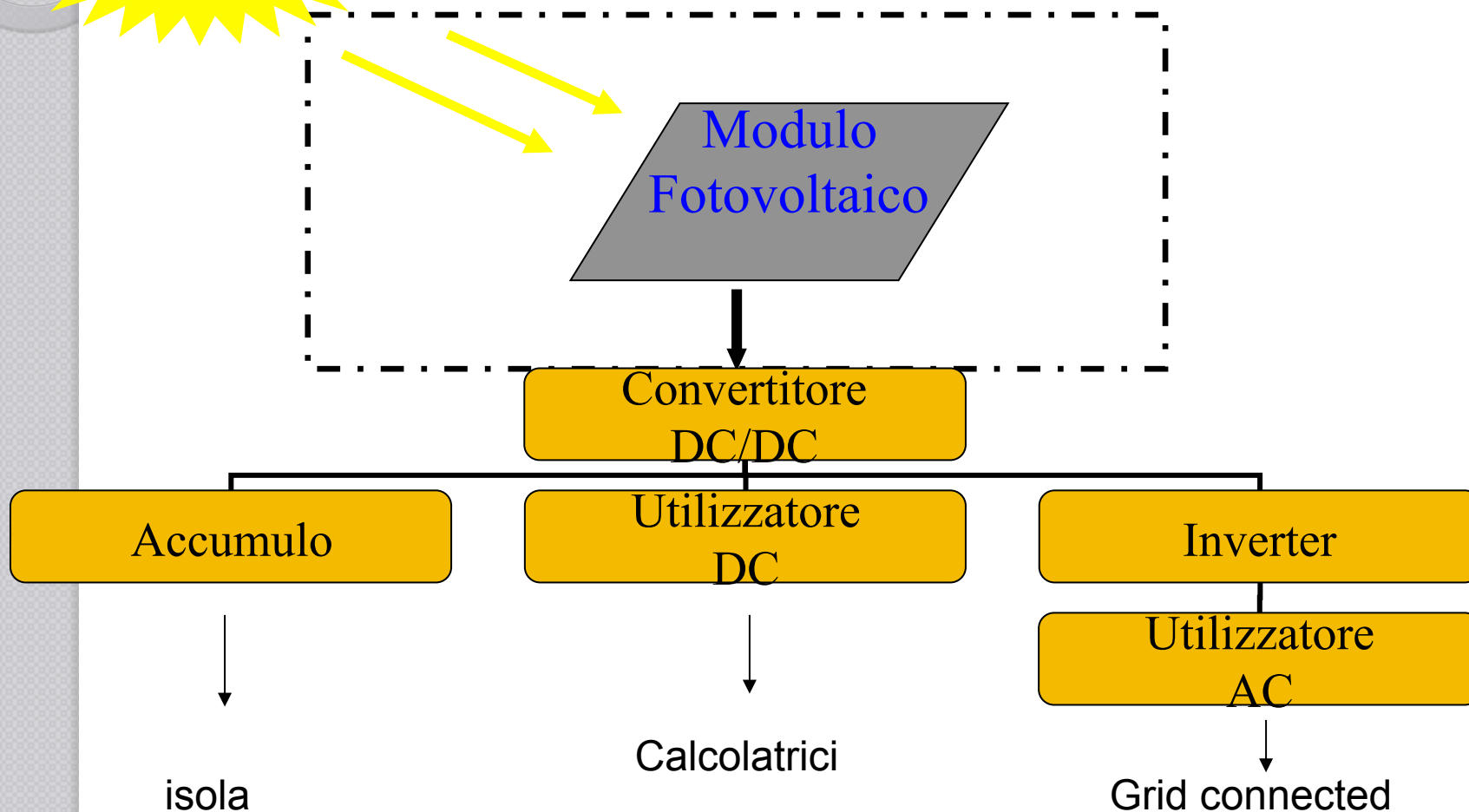
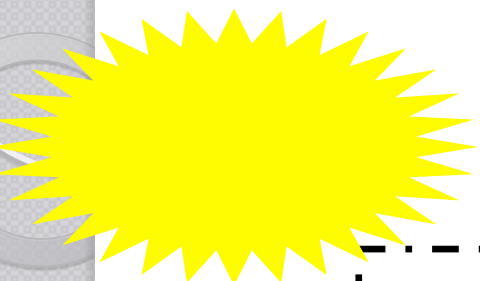
L'elemento principale della tecnologia fotovoltaica è la **cella in silicio**, capace di convertire l'energia luminosa, su di essa incidente, direttamente in energia elettrica.



Schema di un impianto PV

Un convertitore DC-DC è un circuito che converte una sorgente di corrente continua da una tensione a un'altra

Un inverter è un dispositivo elettronico in grado di convertire corrente continua in corrente alternata eventualmente a tensione diversa

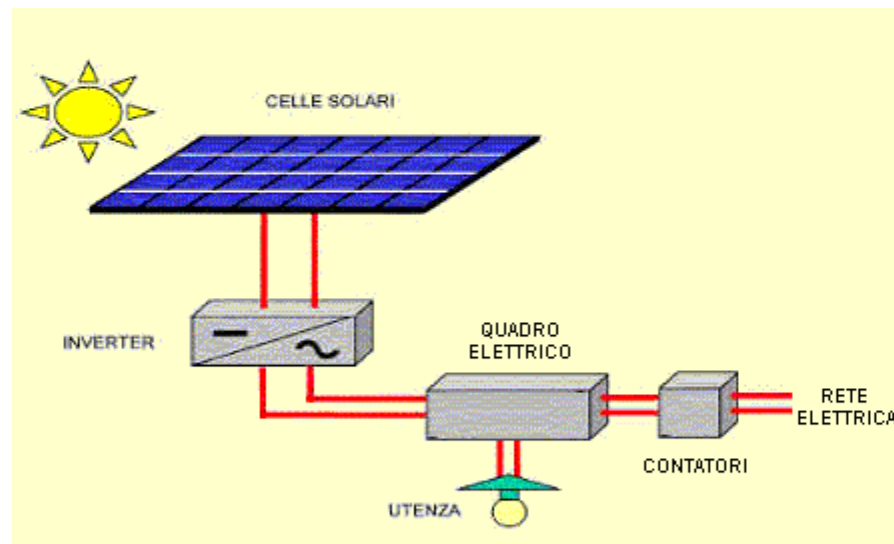


Tipologie di impianti

- **Impianti in funzionamento ad ISOLA**
(Stand-Alone o Off-Grid)
- **Impianti CONNESSI IN RETE**
(Grid-Connected)
- **Applicazioni** su cartellonistica, segnalazione e illuminazione:
Stand-Alone

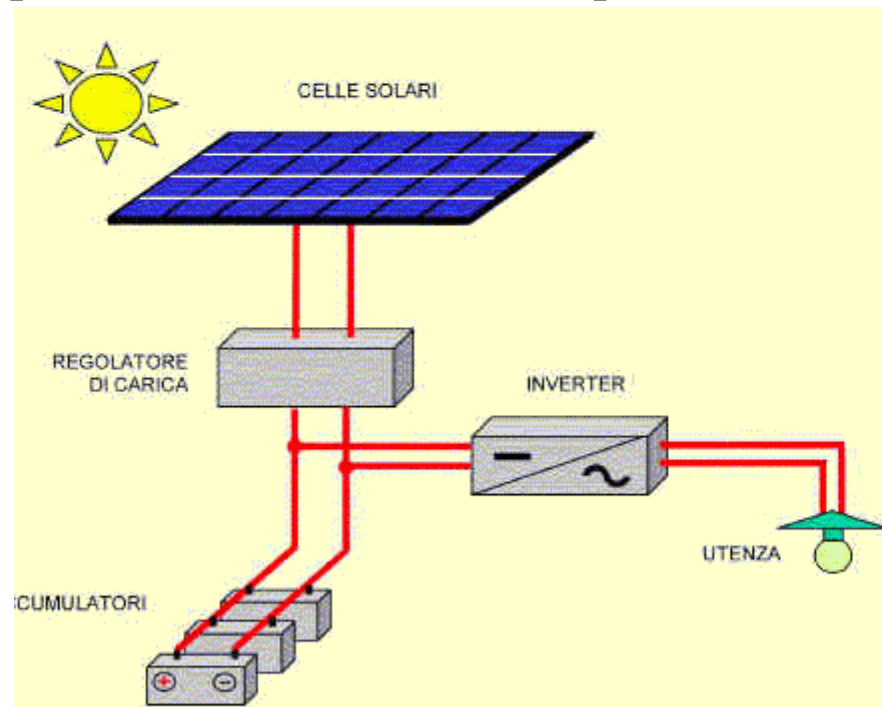
L' impianto fotovoltaico grid-connected

- L' impianto è connesso alla rete di distribuzione (grid connected)
- C' è la necessità di un contatore bidirezionale
- Un componente fondamentale dell' impianto è l' inverter che consente di convertire la corrente continua in alternata (50 Hz)
- Per dimensionare l' impianto è opportuno conoscere lo storico dei consumi e l' andamento giornaliero degli stessi



L' impianto fotovoltaico a isola

- L' impianto funziona indipendentemente dalla rete elettrica pubblica.
- l' accumulatore fornisce l' energia elettrica quando i moduli non sono in grado di produrne, per mancanza di irradiazione solare.
- Il regolatore di carica è un apparecchio elettronico che regola la ricarica e la scarica degli accumulatori. Uno dei suoi compiti è di interrompere la ricarica ad accumulatore pieno.
- Utenze: apparecchi alimentati dall' impianto fotovoltaico.



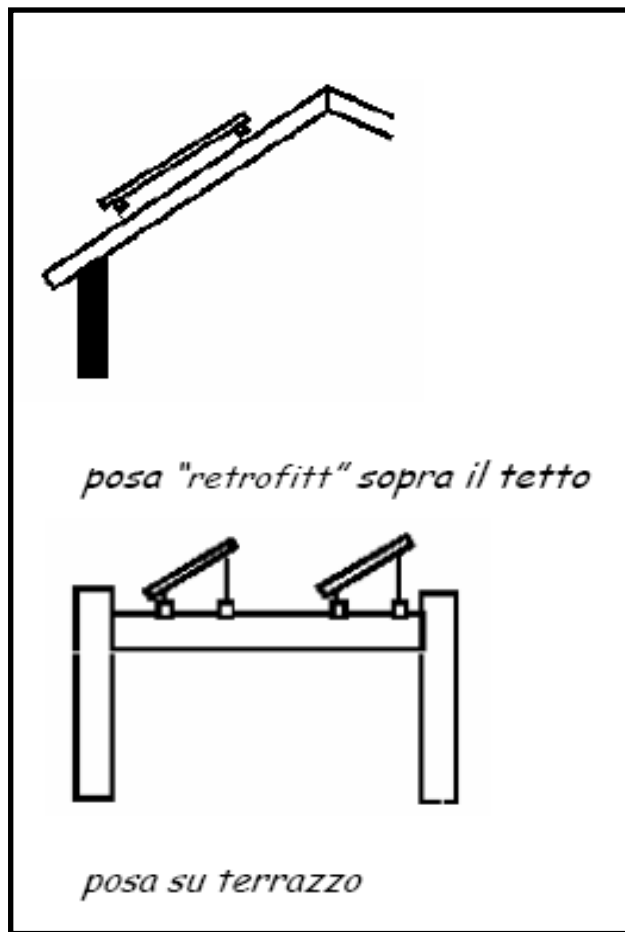
Applicazioni Stand Alone



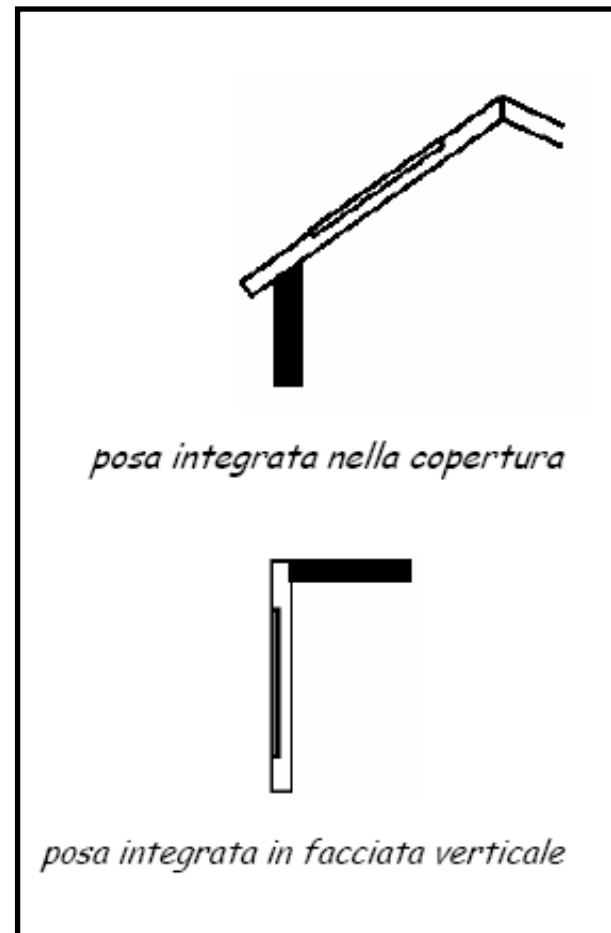
Esempio di applicazione



Posizionamento dei moduli



Retrofit



**Ad integrazione
architettonica**

Posizionamento dei moduli



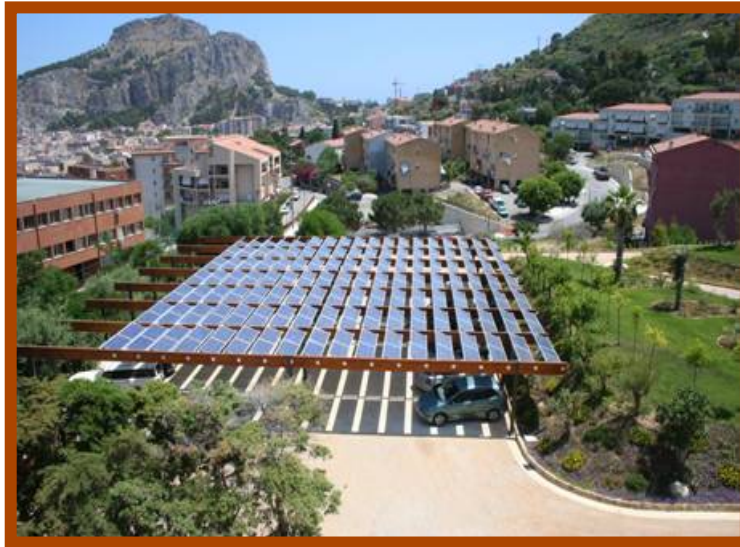
b1) non integrato

Posizionamento dei moduli



b2) parzialmente integrato

Posizionamento dei moduli



b3) integrato

Il fotovoltaico: alcune applicazioni

Impianti connessi in rete



Impianto 2,2 kWp abitazione privata ROMA



Impianto 18 kWp ASL Adria

Il fotovoltaico: alcune applicazioni

Impianti isolati



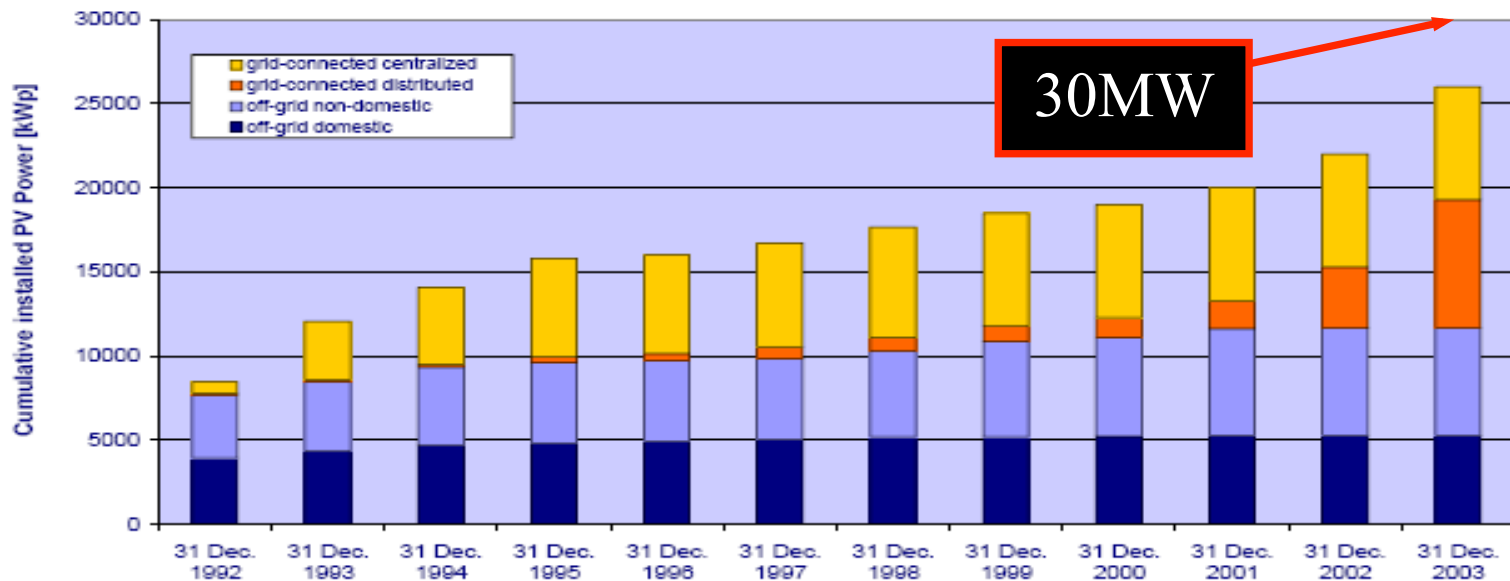
**Impianto fotovoltaico stand alone 3 kWp
Rifugio Gombo alto (BG)**

Piccole reti isolate



**Stromboli: l' impianto per il villaggio di Ginostra
Sistema isolato da 100 kWp**

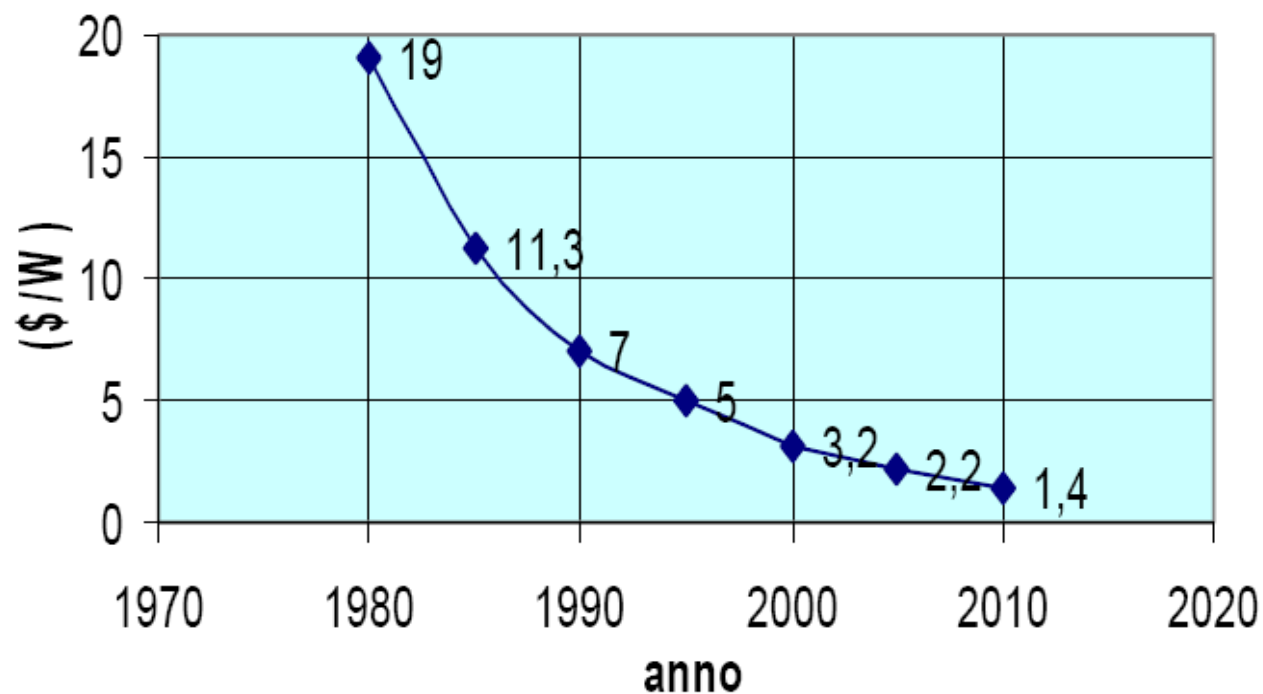
L'uso del fotovoltaico in Italia



VALORI CUMULATIVI (Fonte: Enea)

- C'è stata un incremento a partire dal 2001 come installazione annua.
- Il ministero dell'ambiente prevedeva 20 MW installati tra 2002 e 2003 e prevedeva 300 MW entro 2010
- Nel 2013 erano stati installati circa 18.000 MW

Andamento dei prezzi dei moduli



Da noi, il prezzo attuale del modulo fotovoltaico si aggira attorno ai 0.5 €/W