

## INTRODUZIONE

Nell'attuale contesto energetico ed ambientale globale è diventato rilevante e prioritario, soprattutto negli ultimi anni, l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra e di sostanze inquinanti; ciò è possibile anche grazie allo sfruttamento di risorse energetiche alternative e rinnovabili, che affianchino e riducano l'utilizzo di combustibili fossili, oltretutto destinati ad esaurirsi per il loro considerevole consumo da parte dei paesi più industrializzati.

Il sole costituisce la fonte energetica indubbiamente più diffusa sul nostro pianeta, disponibile gratuitamente e in misura di molto superiore al fabbisogno energetico della popolazione mondiale.

L'energia solare è, inoltre, virtualmente inesauribile e rappresenta la quasi totalità dell'energia utilizzata sulla Terra. Oltre all'apporto diretto sotto forma di luce e calore, essa è all'origine della biomassa (mediante i processi di fotosintesi), del ciclo dell'acqua, dei venti, delle correnti oceaniche, e in modo immagazzinato, delle riserve di gas, petrolio e carbone.

Esistono vari sistemi per lo sfruttamento dell'energia solare, ma essi richiedono in generale una conversione energetica per arrivare alla produzione di energia elettrica; un esempio è la conversione prodotta dalle turbine idroelettriche, in grado di trasformare in corrente elettrica, l'energia potenziale di una massa d'acqua, evaporata grazie al contributo dell'energia del sole e in seguito condensatasi in bacini e corsi d'acqua.

Tra i diversi sistemi che permettono di sfruttare l'energia del sole, la tecnologia fotovoltaica è particolarmente interessante ed efficace, poiché permette la conversione diretta della luce in energia elettrica; il fotovoltaico è promettente per le qualità intrinseche del sistema stesso, per i ridottissimi costi d'esercizio (il combustibile è gratuito), limitate esigenze di manutenzione, affidabilità e semplicità d'installazione e utilizzo.

## **1. Impianti fotovoltaici**

Un impianto fotovoltaico è un impianto elettrico costituito da diversi elementi, tra i quali i moduli fotovoltaici, in grado di produrre energia elettrica per effetto fotovoltaico.

Nel presente capitolo fornirà un quadro generale dei componenti che lo costituiscono e del loro funzionamento.

### **1.1 Energia solare**

Nel nucleo del Sole avvengono costantemente reazioni di fusione termonucleare, innescate grazie alle elevatissime temperature (nell'ordine dei milioni di gradi) che si raggiungono all'interno della stella, le quali generano enormi quantità di energia; l'irradianza complessiva solare a livello della superficie esterna del sole (fotosfera) è pari a circa  $63.000 \text{ kW/m}^2$ , dove per irradianza si intende l'intensità della radiazione elettromagnetica incidente su una superficie di area unitaria; tale intensità è pari all'integrale della potenza per area unitaria associata a ciascun valore di frequenza dello spettro della radiazione solare.

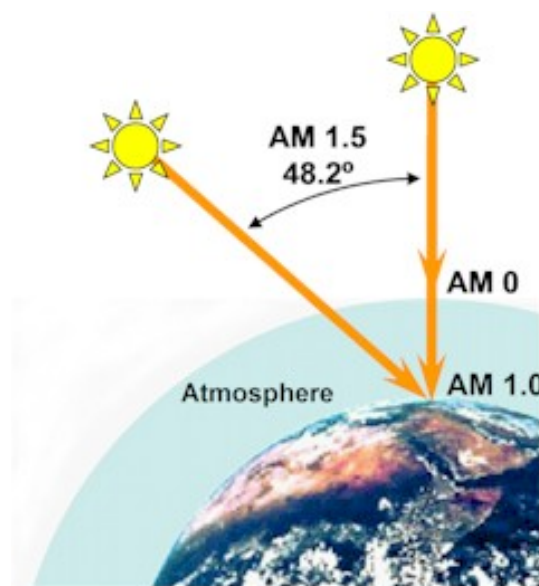
Parte di questa energia viaggia nello spazio, sotto forma di onde elettromagnetiche, fino a incontrare l'atmosfera terrestre, con un irraggiamento medio di circa  $1.367 \text{ W/m}^2$  (costante solare), che varia in funzione della distanza Terra-Sole nei vari momenti dell'anno, e dell'attività solare (variazione di circa  $\pm 3,3\%$ ).

La radiazione che prosegue viene in parte diffusa dall'aria e dalle particelle solide in sospensione nell'aria.

A livello del suolo, si registrano valori d'irraggiamento inferiori alla costante solare, dovuti ai fenomeni di assorbimento, rifrazione e riflessione operati dai

gas contenuti nell'atmosfera terrestre, che modificano inoltre anche la composizione spettrale della radiazione.

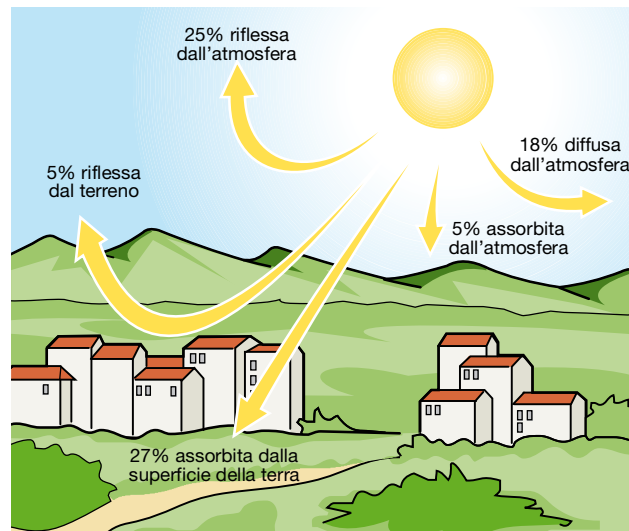
Per irradiazione solare s'intende l'integrale dell'irraggiamento solare su un periodo specificato e si misura in kWh/m<sup>2</sup>. Per tener conto dei fenomeni di assorbimento spettrale legati all'attraversamento dell'atmosfera da parte della radiazione solare, è stato definito il parametro di massa d'aria AM (Air Mass); esso esprime il rapporto tra la lunghezza dell'effettivo percorso compiuto dai raggi solari nell'atmosfera, e il suo spessore minimo, cioè la lunghezza del percorso nel caso in cui il sole si trovi esattamente allo zenit. In quest'ultimo caso, cioè quando i raggi solari arrivano perpendicolarmente al suolo, il valore di AM è quello unitario, mentre ad AM 0 corrisponde un'attenuazione nulla ossia alla misurazione della radiazione solare al di fuori dell'atmosfera.



**Figura 1 - Esempio di Air Mass in funzione dell'inclinazione dei raggi solari**

Infine, la radiazione che incide su di una superficie orizzontale, è pertanto composta di una parte diretta, associata all'irraggiamento diretto sulla superficie, di una parte diffusa, che arriva dal cielo in ogni direzione, e da una riflessa dal terreno e dall'ambiente circostante la superficie in esame

(quest'ultima dipende dalla capacità dell'ambiente di riflettere e viene misurata mediante il coefficiente di albedo).

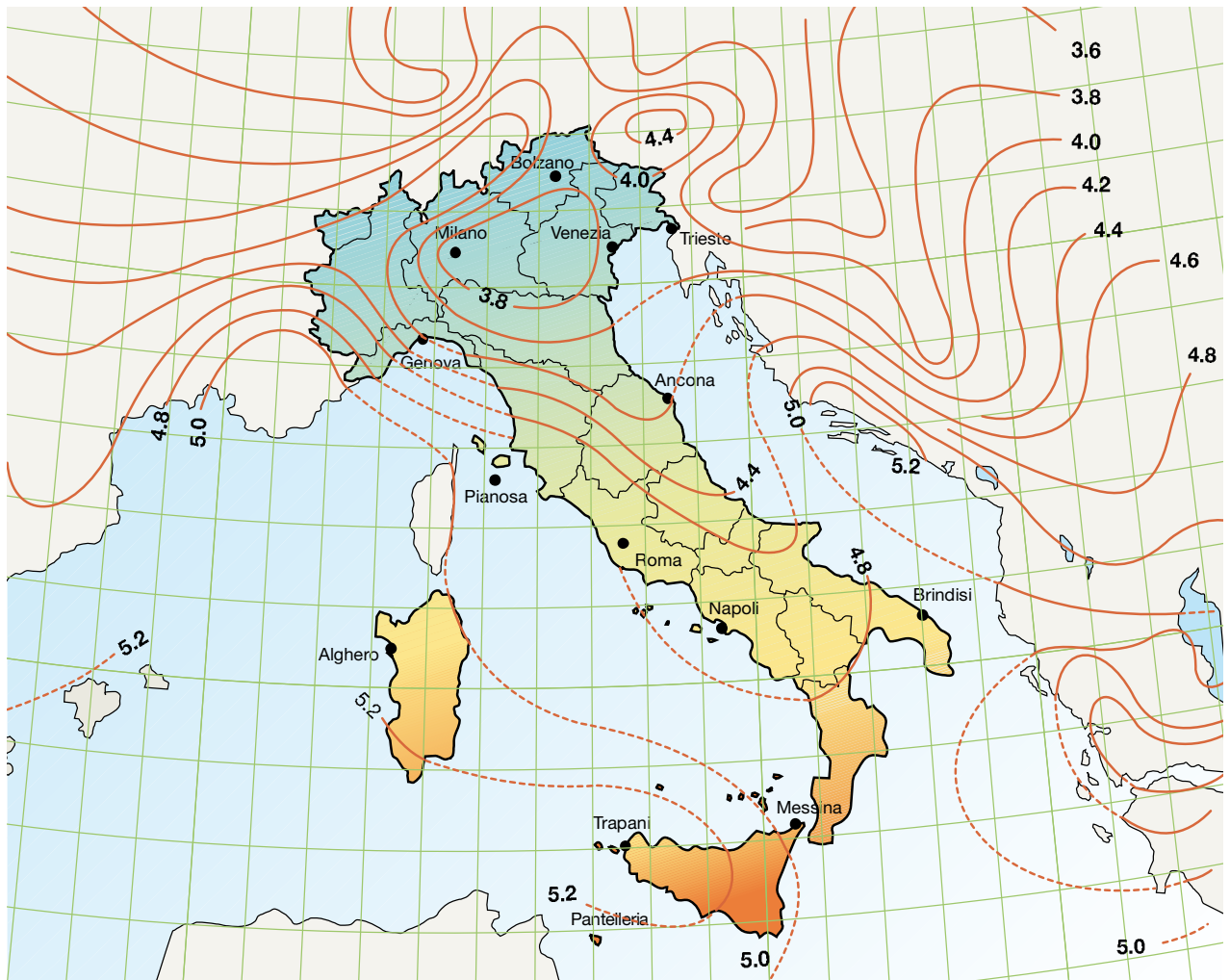


**Figura 2 - Ripartizione dell'energia solare incidente sull'atmosfera**

A causa dell'estrema variabilità dei fattori ambientali e della loro notevole influenza sulle caratteristiche delle celle fotovoltaiche, sono state definite, a livello internazionale, delle condizioni di riferimento rispetto alle quali sono effettuate tutte le prove ed i test relativi ai moduli fotovoltaici; queste prendono il nome di STC (standard test conditions) e corrispondono ad una temperatura sulla superficie della cella pari a 25°C, un irraggiamento di 1.000 W/m<sup>2</sup> e uno spettro della radiazione solare pari a quello riscontrabile in condizioni di AM pari a 1,5. Per avere un'idea delle grandezze in gioco si consideri che la condizione d'irraggiamento standard si avrebbe a mezzogiorno di una serena giornata estiva, situazione nella quale, però, la cella raggiungerebbe temperature ben più elevate di 25°C, ottenibili soltanto durante giornate relativamente fredde.

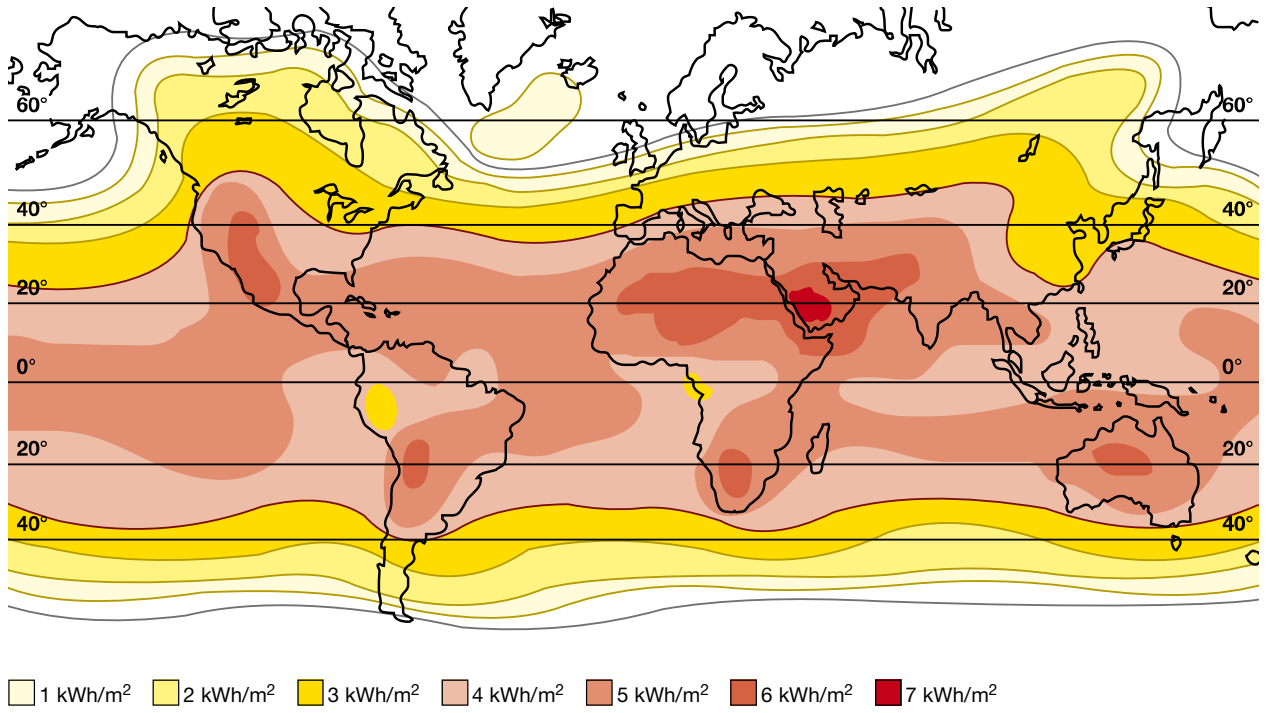
La radiazione annuale in Italia, con l'eccezione delle isole e alcune località particolarmente favorevoli del Sud, è compresa tra circa i 1.750 e 1.300 kWh/m<sup>2</sup>. La radiazione giornaliera è visibile in figura 3.





**Figura 3 - Irradiazione globale giornaliera in kWh/m<sup>2</sup>**

Nell'immagine seguente è rappresentato l'atlante solare mondiale dell'irradiazione media giornaliera sul piano inclinato di 30° rivolto a Sud (kWh/m<sup>2</sup>).



**Figura 4 - Atlante solare**

## 1.2 Principio di funzionamento



**Figura 5 – Esempio di impianto fotovoltaico (Magazzino Bonatti, PR)**

Un impianto fotovoltaico trasforma direttamente ed istantaneamente l'energia solare in energia elettrica; questa tecnologia funziona mediante l'effetto fotoelettrico, per mezzo del quale materiali semiconduttori opportunamente drogati generano elettricità se esposti alla radiazione solare. I principali vantaggi di un impianto fotovoltaico possono essere riassunti in alcuni punti:

- generazione sul posto, in modo autonomo e indipendente;
- assenza di emissione di sostanze inquinanti;
- risparmio di combustibile;
- affidabilità (commercialmente garantita a circa 20 anni);
- ridotti costi d'esercizio e manutenzione;
- modularità del sistema secondo le esigenze dell'utente.

Nonostante gli aspetti positivi, la tecnologia fotovoltaica presenta ancora mancanze notevoli; tra queste le più significative sono la discontinuità della produzione a causa della variabilità della fonte solare, ed un rendimento energetico abbastanza basso, con valori tra il 10 e il 20 % circa per i comuni pannelli di uso commerciale, causa un mercato che si trova ancora in una prima fase di sviluppo tecnico ed economico, ma che ha effettuato grandi progressi in pochi anni e mostra ancora una notevole crescita. Inoltre un impianto fotovoltaico presenta un elevato costo di realizzazione, che tuttavia si sta riducendo in modo significativo.

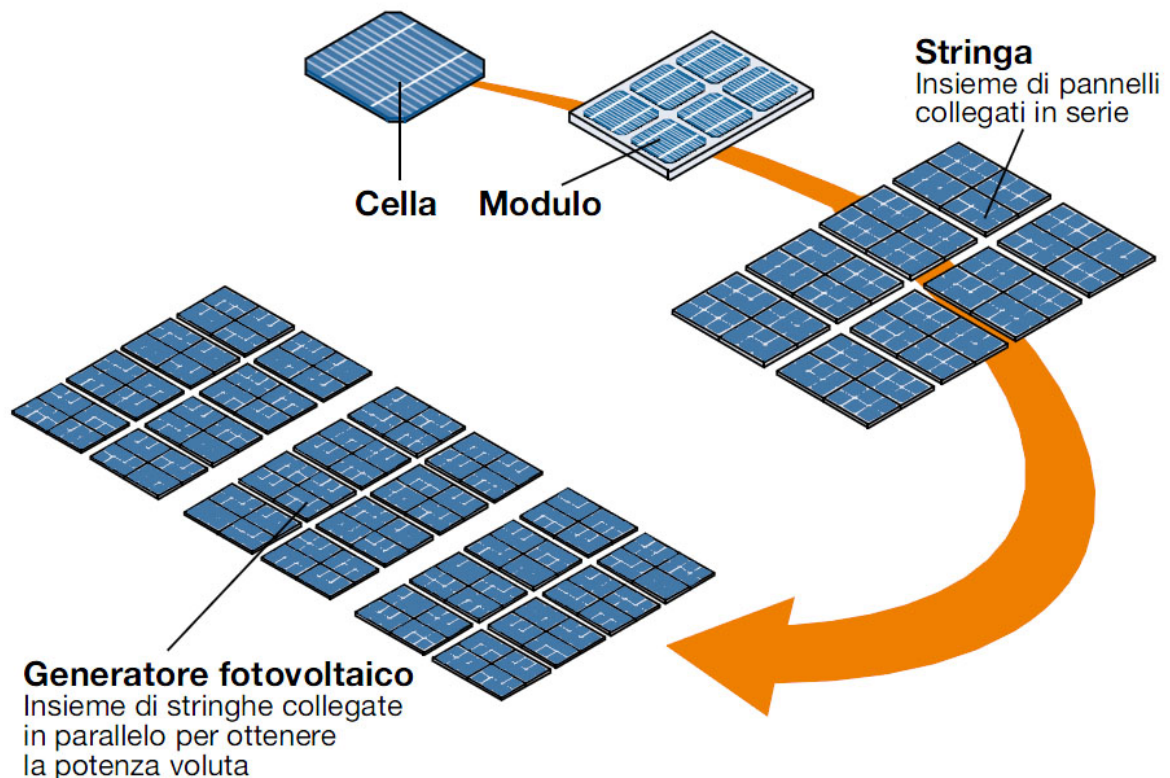
### **1.3 Componenti di un impianto fotovoltaico**

Si definisce sistema fotovoltaico *“l’insieme dei componenti meccanici, elettrici, ed elettronici che concorrono a captare e trasformare l’energia solare disponibile, rendendola utilizzabile dall’utenza sotto forma di energia elettrica”*.

Il solo insieme dei moduli fotovoltaici, pur costituendo l’elemento principale del sistema al centro del processo produttivo, non è sufficiente per la realizzazione di un impianto in grado di approvvigionare gli utenti dell’energia richiesta; il sistema nel suo complesso è quindi più esteso e comprende l’utilizzo di altri strumenti che permettono nel loro complesso la trasformazione, gestione, monitoraggio e trasmissione dell’energia prodotta in condizioni di sicurezza per l’utente, l’installatore e il gestore.

#### **1.3.1 Generatore fotovoltaico**

Il generatore fotovoltaico consiste nell’insieme dei dispositivi in grado di convertire l’energia solare in corrente continua; le parti che compongono il generatore sono visibili in figura 6.



**Figura 6 – Suddivisione del generatore fotovoltaico**

### 1.3.1.1 Cella fotovoltaica

L'elemento principale di un impianto fotovoltaico è costituito dalle strutture nelle quali avviene la generazione elettrica, ossia il generatore fotovoltaico; il componente elementare del generatore è la cella fotovoltaica.

Nelle celle è possibile convertire la radiazione solare incidente in corrente elettrica continua; questo processo è possibile grazie alle proprietà di alcuni materiali detti semiconduttori: si tratta di sostanze cristalline, organiche o inorganiche, con resistività intermedia tra quella dei conduttori e degli isolanti. La resistività di un materiale semiconduttore diminuisce all'aumentare della temperatura.

La conversione fotovoltaica avviene sfruttando le cosiddette giunzioni p-n, le quali sono alla base di gran parte della strumentazione elettronica (il che ha

permesso di facilitare lo sviluppo della tecnologia solare sfruttando le conoscenze in precedenza acquisite, e le stesse fonti di materia prima cui attinge l'elettronica).

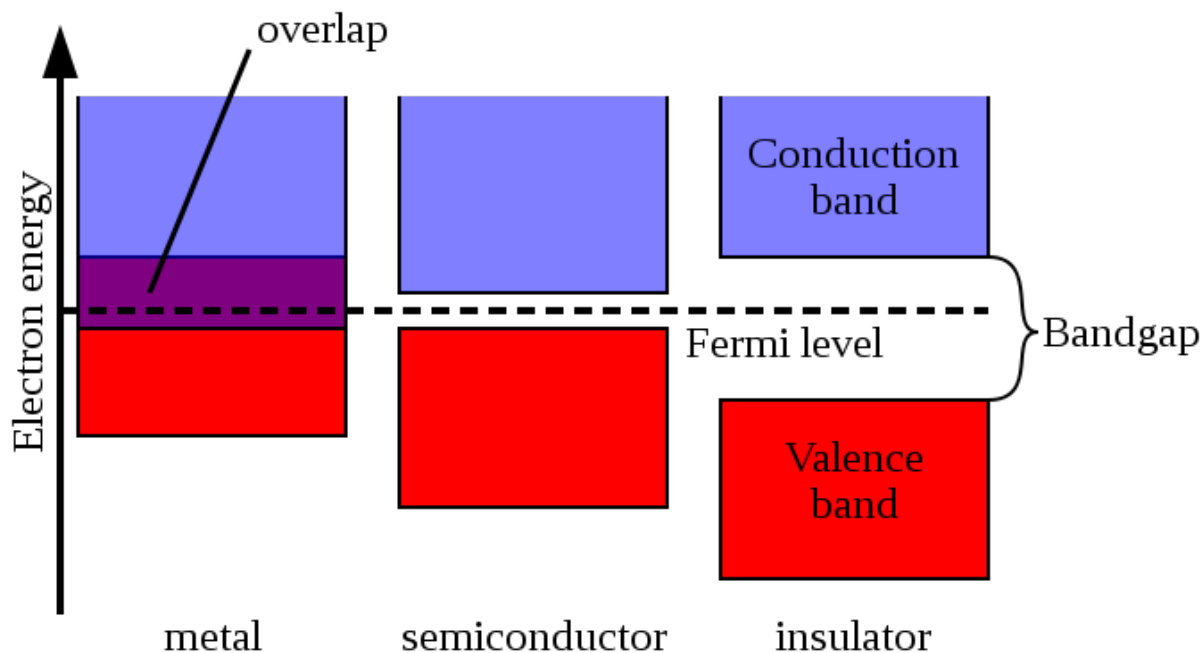
I semiconduttori, come per esempio il silicio (Si, numero atomico 14) sono organizzati in reticoli cristallini: ogni atomo è circondato da altri 4, dove ognuno mette in comune uno dei suoi 4 elettroni di valenza per raggiungere la configurazione stabile ed avere l'ottetto esterno completo; in questo modo il silicio mantiene uno stato elettricamente neutro, poiché il numero dei protoni ed elettroni è il medesimo.

Gli elettroni delle orbite più interne sono fortemente legati al nucleo e non entrano in gioco nei legami con gli altri atomi e nella conduzione elettrica. Nella situazione appena descritta si parla di cristalli intrinseci, ossia puri, dove la conduzione e lo spostamento di elettroni all'interno del reticolo può avvenire solo ad elevate temperature o comunque in condizioni tali per cui vi sia sufficiente energia per eccitare gli elettroni.

Il fenomeno della conduzione è descritto facendo riferimento alla teoria delle bande energetiche, secondo la quale ogni elettrone in un atomo occupa un livello energetico distinto da tutti gli altri; poiché in un reticolo si ha la presenza di un grande numero di elettroni, il modello teorico prevede che i livelli energetici si affianchino l'uno all'altro fino a formare delle vere e proprie bande di livelli energetici.

Considerando solo gli elettroni dell'ottetto esterno (gli unici utili al fine dei legami con gli altri atomi) è possibile definire le cosiddette bande di valenza e di conduzione, separate da un valore di energia detto energy gap, che dipende essenzialmente dal tipo di materiale e da ulteriori fattori come ad esempio la temperatura. La posizione delle bande e la collocazione degli elettroni al loro interno, varia a seconda che si stia considerando materiali conduttori, isolanti o semiconduttori, come mostrato in figura 7.





**Figura 7 - Rappresentazione del modello delle bande energetiche**

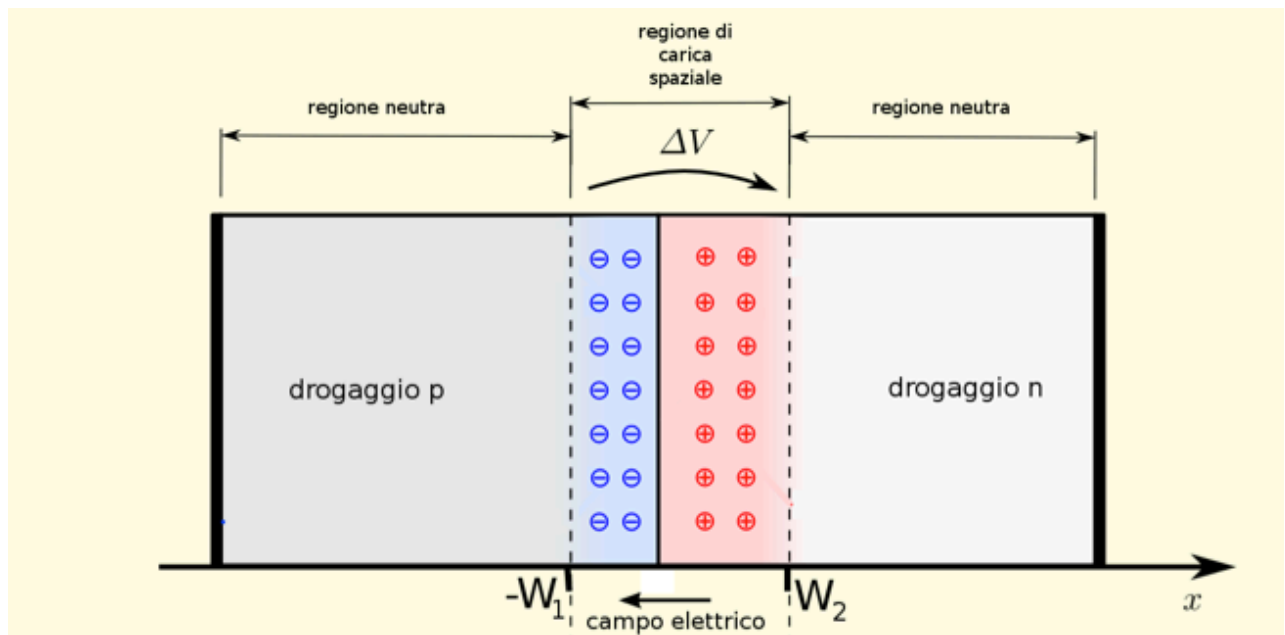
La conduzione avviene nel momento in cui un elettrone, eccitato da una certa quantità di energia, è in grado di muoversi liberamente lungo un livello energetico. Per ogni elettrone che lascia il livello in cui si trovava in precedenza, si crea un posto vuoto detto lacuna, la quale partecipa anch'essa alla conduzione spostandosi lungo il suo livello energetico, all'interno di una delle due bande.

Nel caso dei conduttori il fenomeno è facilitato da livelli energetici liberi immediatamente presenti dopo quelli occupati (infatti la banda di valenza è piena solo parzialmente), mentre per i semiconduttori è necessaria una quantità minima di energia per passare alla banda di conduzione, poiché quella di valenza è completamente occupata. Per gli isolanti la situazione è analoga a quella dei semiconduttori, solo che il valore di energy gap risulta essere particolarmente elevato, ostacolando così la conduzione.

E' possibile inserire all'interno dei reticoli cristallini intrinseci, piccole quantità di impurità rappresentate da altri elementi chimici diversi da quelli che compongono il reticolo; nel caso del silicio è possibile introdurre, ad



esempio, un atomo del III gruppo come il Boro, avente solo 3 elettroni nell'orbita esterna, generando così una lacuna nella banda di valenza, oppure un atomo del V gruppo come il Fosforo, avente 5 elettroni esterni e ottenendo così un elettrone in più debolmente legato al reticolo e in grado di passare facilmente in banda di conduzione.



**Figura 8 - Rappresentazione schematica di una giunzione p-n**

Questo processo prende il nome di drogaggio e consente di variare la concentrazione di lacune ed elettroni all'interno del semiconduttore; un drogaggio è detto di tipo p se aumenta la concentrazione delle lacune, di tipo n se aumenta la concentrazione degli elettroni; è importante notare che il materiale resta comunque complessivamente neutro.

Una giunzione p-n è formata mettendo a contatto due semiconduttori, uno drogato p e l'altro drogato n; la diversa concentrazione di portatori di cariche (lacune ed elettroni) fa sì che nasca per diffusione un passaggio di lacune dal semiconduttore drogato p a quello drogato n ed un passaggio di elettroni in senso opposto, con la conseguente formazione nella zona di contatto di una regione detta regione di carica spaziale o di svuotamento (figura 8).

Il fenomeno si protrae finché il potenziale elettrico generato dallo spostamento di cariche non è tale da equilibrare il moto di diffusione.

In questo stato la giunzione p-n è utilizzata in elettronica per costruire dispositivi che permettono il passaggio della corrente in un verso solo, detti diodi.

Nel caso delle celle fotovoltaiche, la generazione di corrente coinvolge due processi fondamentali; il primo consiste nell'assorbimento dei fotoni incidenti e nella conseguente creazione di una coppia elettrone-lacuna. Da solo però questo fenomeno è insufficiente a generare una corrente poiché elettrone e lacuna separatamente esistono solo per poco tempo e tendono a ricombinarsi; se ciò si verifica senza ulteriori avvenimenti, non si ha una generazione elettrica. Il secondo processo permette quindi di sfruttare il campo elettrico generato all'interno della giunzione p-n per separare elettrone e lacuna generando un flusso di elettroni.

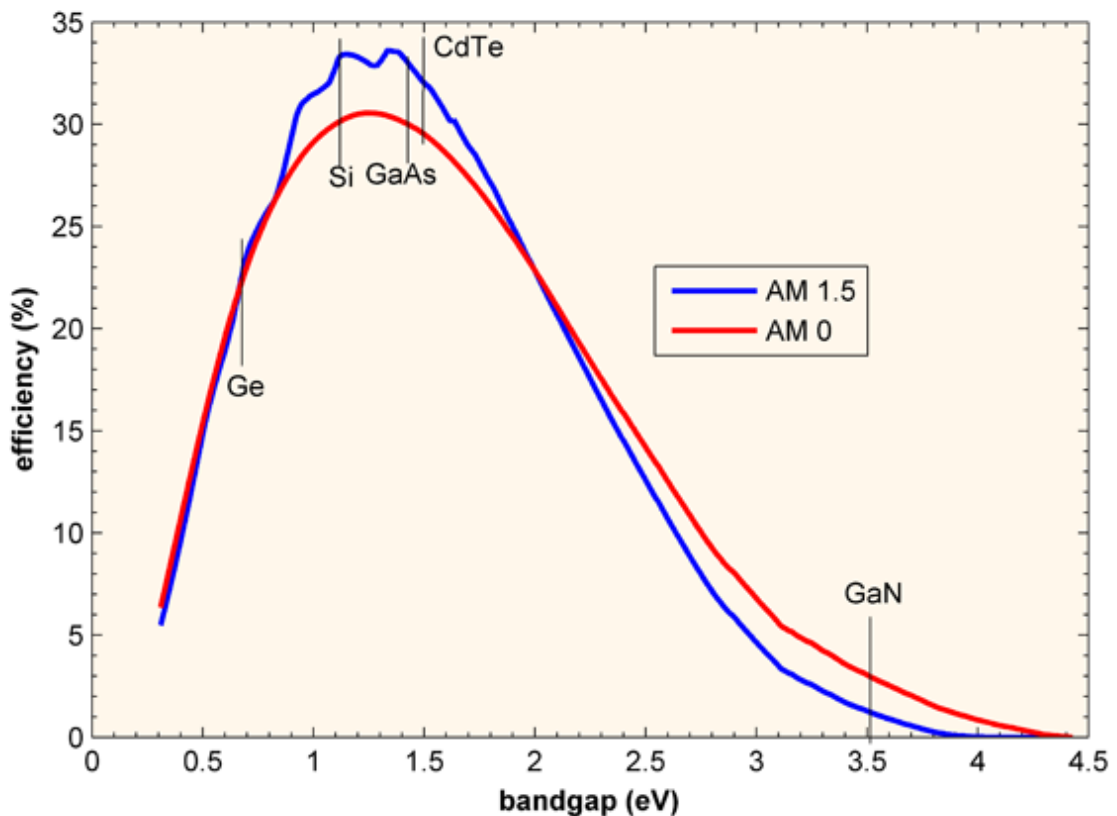
Immaginiamo che in seguito all'incidenza di un fotone si sia generata una coppia elettrone-lacuna: la lacuna viene spazzata dal campo elettrico attraverso la zona di svuotamento, mentre l'elettrone compie un giro esterno alla giunzione attraverso un circuito elettrico (generando corrente) per poi ricombinarsi nuovamente con la lacuna. La cella fotovoltaica si comporta quindi come un generatore elettrico con polo positivo sulla giunzione p e negativo sulla giunzione n.

Ai fini della conversione fotovoltaica i fotoni non sono tutti equivalenti, infatti il loro contenuto energetico dipende dalla frequenza e dalla lunghezza d'onda della radiazione secondo l'equazione di Planck,  $E = h\nu$ , dove  $h$  è la costante di Planck,  $\nu$  rappresenta la frequenza ed  $E$  è l'energia posseduta dal fotone.

L'energia del fotone è espressa in Joule, ma è solitamente usato per le applicazioni di questo tipo l'elettronvolt eV ( $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ).

Per poter essere assorbiti i fotoni che investono la cella devono possedere un'energia superiore ad un valore minimo pari all'energy gap del materiale; se

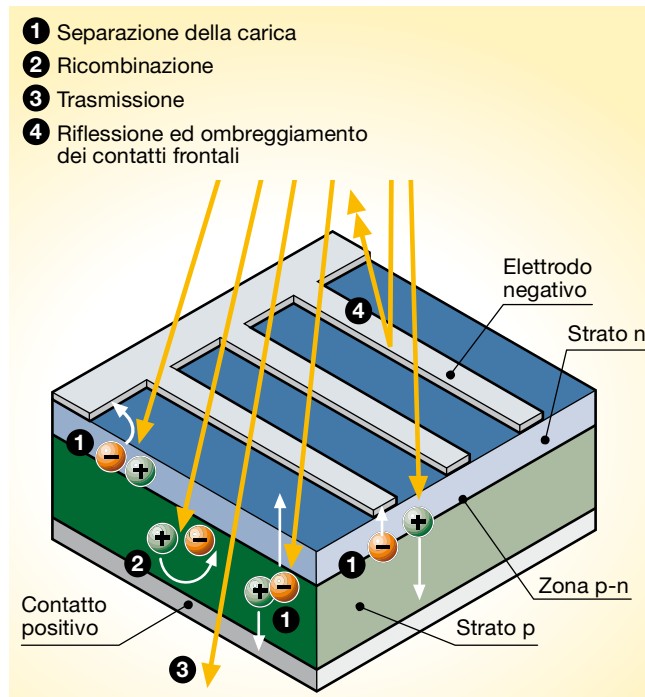
ciò non si verifica i fotoni attraversano la giunzione senza innescare alcun processo.



**Figura 9 - Efficienza di conversione di differenti materiali in funzione del band-gap; l'arseniuro di gallio risulta essere il materiale più efficiente**

L'emissione di radiazioni da parte di un corpo dipende dalla temperatura, in funzione della quale è possibile identificare una frequenza per la quale vi è il massimo dell'emissione; l'efficienza di conversione dei diversi materiali varia quindi in funzione dello spettro della radiazione incidente e dell'energy gap proprio del materiale in determinate condizioni di funzionamento. Dal grafico si nota che il materiale più efficiente è l'arseniuro di gallio; per il silicio cristallino, invece, tutta la parte di radiazione con lunghezza d'onda superiore a 1.1 micrometri, risulta dotata di energia insufficiente e non viene utilizzata. Anche i fotoni con troppa energia comunque vengono sfruttati solo parzialmente: in questo caso vengono assorbiti, ma la frazione di energia in

eccesso viene trasformata in calore e perduta quindi dal punto di vista elettrico.



**Figura 10 - Schema dell'effetto fotovoltaico e dei fenomeni che avvengono nella cella**

In linea generale, è possibile fornire una descrizione del processo di conversione della cella in termini energetici; i valori riportati in seguito appartengono ad un caso particolare, poiché come si è visto il rendimento di una cella fotovoltaica varia in funzione della sua tipologia costruttiva, ma consentono di avere un'idea più chiara della provenienza del valore di efficacia di conversione.

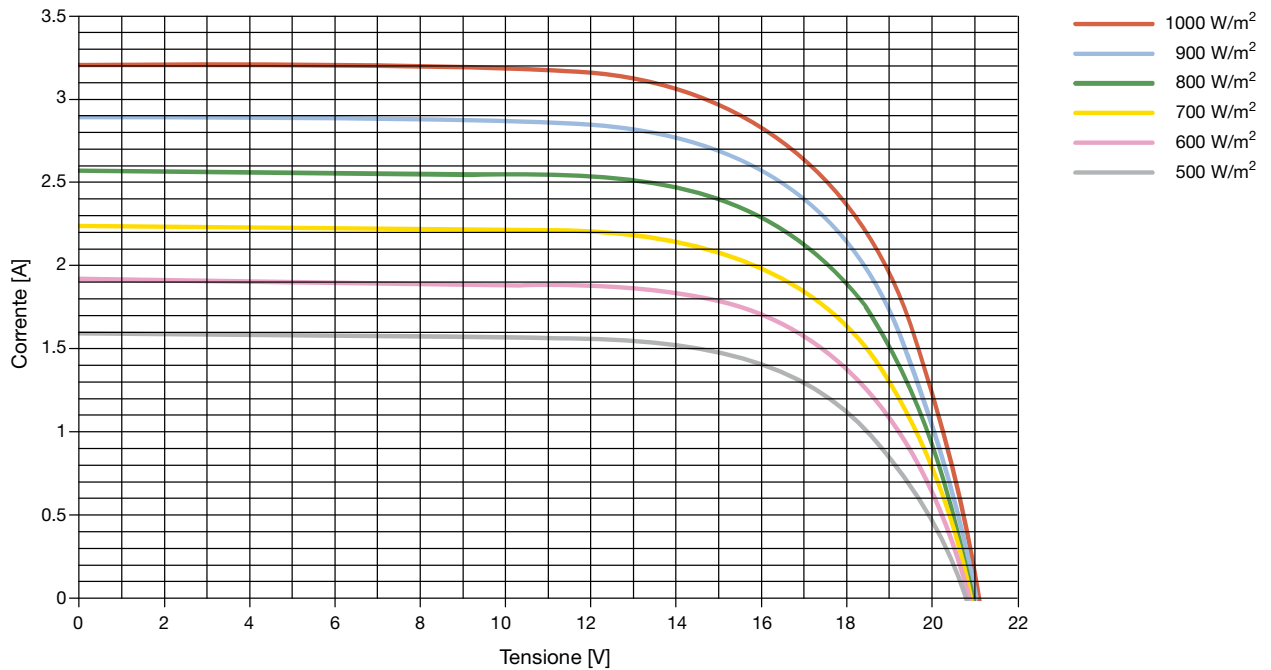
Considerando il 100% di energia solare incidente sulla cella, si presentano i seguenti valori tipici di perdita:

- 3% per riflessione ed ombreggiamento dei contatti frontali;
- 23% per fotoni con lunghezza d'onda elevata, dotati di insufficiente energia per eccitare elettroni;
- 32% per fotoni con lunghezza d'onda corta, con energia in eccesso;

- 8,5% per ricombinazione dei portatori di carica libera, che statisticamente non formano una corrente elettrica, ma ritornano nello stato precedente all'eccitazione;
- 20% per il gradiente elettrico nella cella, specialmente nella regione di transizione;
- 0,5% per la resistenza in serie, rappresentativa delle perdite elettriche di conduzione.

Risulta che quindi soltanto il 13% dell'energia può essere convertito in energia elettrica utilizzabile. Questo è solamente un esempio e usando materiali e procedimenti diversi si possono ottenere celle con rendimenti molto più elevati, ma anche con costi molto superiori.

A livello elettrico la cella fotovoltaica investita da luce può essere descritta come un generatore di corrente, il cui comportamento è rappresentato attraverso le curve caratteristiche tensione-corrente (figura 11), dove è possibile individuare il punto di esercizio del generatore in funzione della tensione d'esercizio.



**Figura 11 - Abbassamento della corrente di corto circuito in funzione dell'irraggiamento**

La forma della curva si ottiene trasladando nel quarto quadrante la caratteristica di un diodo, e rappresentando il grafico rovesciato rispetto all'asse delle ascisse (ossia considerando i valori di corrente con segno opposto a quello di partenza e lasciando inalterato il segno della tensione).

Le curve dipendono strettamente dalle caratteristiche della cella e sono tracciate a partire dai valori di corrente in corto circuito  $I_{sc}$  e di tensione a circuito aperto  $V_{oc}$ .

La curva è caratterizzata principalmente da tre parametri:

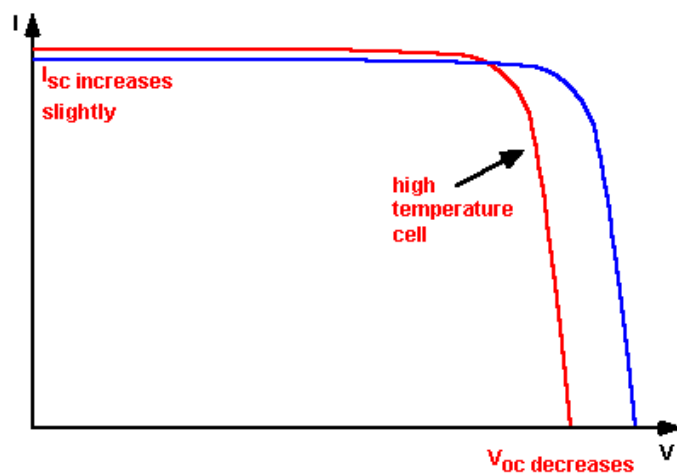
- intensità dell'irradianza;
- temperatura alla giunzione;
- area della cella.

La corrente di corto circuito è quella che percorre la cella quando la differenza di potenziale alle sue estremità è zero; essa è fortemente influenzata, in modo

direttamente proporzionale, dal valore dell'irradianza solare, ossia dall'intensità della luce incidente e dall'area della cella (figura 11).

La tensione a vuoto o a circuito aperto, è la tensione ai poli della cella quando la corrente che la percorre è zero; essa è influenzata in minima parte dall'irradianza, quanto piuttosto dal materiale della cella e dalla temperatura a cui essa si trova, come visibile in figura 12. Infatti, la tensione a vuoto diminuisce all'aumentare della temperatura secondo un coefficiente variabile in funzione del materiale, che, solitamente è pari a circa  $-0.4\% / ^\circ\text{C}$ .

Il fenomeno è presente anche a riguardo della corrente di corto circuito, ma risulta meno rilevante e il coefficiente è positivo (figura 12). In sede di progettazione queste considerazioni, soprattutto per quanto riguarda la  $V_{oc}$ , assumono un valore molto importante, poiché influiscono notevolmente in termini di tensione dell'impianto e vanno valutate nel momento della scelta dell'inverter e nella progettazione dello schema elettrico.



**Figura 12 - Abbassamento della tensione di circuito aperto in funzione della temperatura**

L'area della cella non influenza il valore della tensione, ma esiste una sua proporzionalità diretta con la corrente generata.

Noti i valori di tensione e corrente d'esercizio è possibile conoscere la potenza erogata dal generatore mediante l'equazione  $P = IV$ , dove  $I$  è la corrente in Ampere e  $V$  è la tensione in Volt.

In condizioni di circuito aperto o chiuso sono massimi i valori di tensione o corrente, ma la potenza erogata è sempre zero. Per valutare la potenza che la cella è in grado di generare, nonché la sua qualità, esistono diversi parametri di riferimento.

Un parametro importante, soprattutto in condizioni di utilizzo della cella, è il punto di massima potenza, o MPP (maximum power point), che indica il punto di esercizio sulla curva I-V in corrispondenza del quale viene generata la massima potenza. Si ha:  $P_{max} = V_{mp}I_{mp}$ .

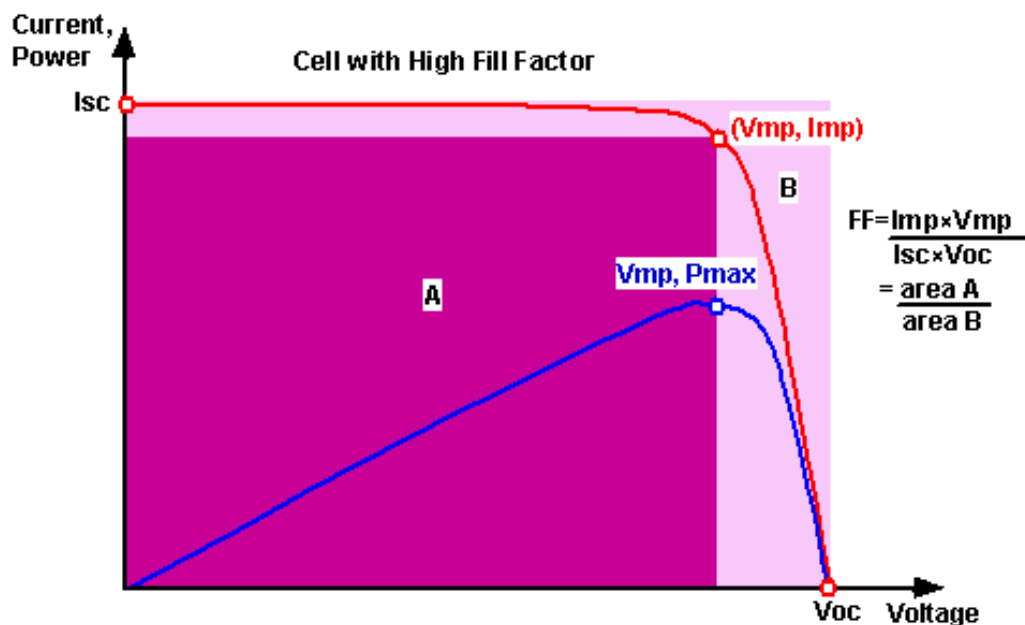


Figura 13 - Rappresentazione del punto di massima potenza e del Fill Factor

La massima potenza è data dal prodotto di particolari valori di corrente e tensione che massimizzano in quelle condizioni, la potenza della cella.

Tra gli altri parametri più significativi vi è poi il fattore di riempimento "fill factor" (o FF), definito come il rapporto tra la massima potenza estraibile dalla cella solare e il prodotto tra  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ . Esso sarà tanto più tendente



all'unità quanto più la curva I-V tenderà ad assomigliare ad un rettangolo avente i vertici in  $I_{sc}$  e  $V_{oc}$ .

L'altro parametro estremamente diffuso per valutare la potenza generata è l'efficienza della cella. L'efficienza è definita come il rapporto tra la potenza massima erogata dalla cella e il valore di irradianza intercettato, dalla sua superficie, in determinate condizioni di temperatura e spettro solare. Poiché questi parametri, così come la potenza generata, dipendono strettamente dalle condizioni ambientali a cui la cella è sottoposta, al fine di poter confrontare varie celle tra loro per paragonarle, le misurazioni devono essere effettuate in condizioni ben definite che prendono il nome di condizioni standard (STC). Queste condizioni, valide in campo internazionale, sono una temperatura alla giunzione di 25 °C, un irraggiamento di 1.000 W/m<sup>2</sup> e uno spettro della radiazione solare pari a AM 1.5. In queste condizioni è possibile esprimere la potenza generata dalla cella in Watt di picco (Wp).

$$P_{max} = V_{oc}I_{sc}FF$$

$$\eta = \frac{V_{oc}I_{sc}FF}{P_{in}}$$

Dove  $V_{oc}$  è la tensione di circuito aperto, la  $I_{sc}$  è la corrente di cortocircuito, FF è il fill factor e  $P_{in}$  rappresenta la potenza in ingresso (ossia il prodotto tra l'irraggiamento in condizioni standard e l'area della cella).

La potenza della cella in STC è definita comunemente come potenza nominale ( $P_{nom}$ ) o potenza di picco ed è espressa in Wp. Questo valore, però, è difficilmente raggiungibile in condizioni di reale funzionamento ed è misurato solitamente in laboratorio, poiché rappresenta una condizione ideale che è estremamente rara a livello climatico; con un irraggiamento di 1000 W/m<sup>2</sup>, infatti, la temperatura della cella, salvo giornate particolarmente fredde,

raggiunge valori ben più alti di 25°C, abbassando quindi notevolmente la potenza erogata.

La figura 14 mostra alcuni dei valori di rendimento delle celle in condizioni standard di laboratorio:

Tecnologia	$\eta$ [%] in condizioni STC
c-Si	25
HIT	22
m-Si	20
a-Si 3 giunzioni	13
a-Si 1 giunzione	4
CdTe	16
CIS – CIGS	19
III-V (tandem)	41
Graetzel	12
Organiche	6

**Figura 14 – Valori di rendimento per differenti tipologie di celle in condizioni standard di laboratorio**

### 1.3.1.2 Tipologie di celle fotovoltaiche

Inizialmente le prime celle fotovoltaiche erano quasi tutte basate sull'utilizzo del silicio come materiale primario per la creazione della giunzione p-n. Il motivo di questa scelta iniziale è da ricercarsi, come in ogni campo di sviluppo, non solo in ambito puramente fisico, ma anche commerciale e storico; il silicio, infatti, era già stato ampiamente studiato e impiegato nell'elettronica a livello mondiale, e ben noti erano quindi i processi necessari alla sua lavorazione. Il silicio è, inoltre, uno dei materiali più abbondanti sulla crosta terrestre e non presenta quindi costi elevati. Per questo la direzione iniziale fu quella di utilizzare il silicio di scarto della produzione elettronica,

poiché il grado di purezza richiesto per la realizzazione delle celle è inferiore a quello per la componentistica elettronica.

In seguito al notevole impulso subito dalla tecnologia solare, si iniziarono a ricercare altri materiali da utilizzare per la costruzione delle celle, in parte per la paura di un aumento eccessivo della richiesta di silicio (e quindi dei costi), ed in parte per cercare di trovare rimedio al basso rendimento che caratterizza il processo di conversione dell'energia solare mediante l'abbattimento dei costi di produzione delle celle (mediante nuovi materiali e tecniche di costruzione).

Attualmente, le tipologie di celle fotovoltaiche sono estremamente varie, così come le tecniche adottate per la loro costruzione, ancora oggi in continua evoluzione.

### **Celle in silicio cristallino**

Come detto in precedenza, il silicio costituisce tutt'ora il principale materiale in uso per la produzione di celle fotovoltaiche, a causa del suo elevato rapporto prestazioni/costo, per la sua disponibilità nonché per la diffusa conoscenza delle sue tecniche di lavorazione. Al giorno d'oggi la produzione in silicio ha acquisito ulteriore importanza a causa della relativa facilità di smaltimento, se confrontata con altri materiali di più complessa gestione.

Le due principali tipologie di celle ottenibili mediante il silicio cristallino sono quelle dette monocristalline, e policristalline. Inoltre, esiste la possibilità di impiegare il silicio allo stato amorfo, come descritta nel paragrafo seguente.

La differenza tra cella mono o policristallina, è determinata dalla differente "cristallinità"; nel primo caso le celle cristalline sono orientate nello stesso verso e legate uniformemente tra loro (unico grano cristallino), mentre nel secondo caso esse sono tra loro aggregate formando grani cristallini orientati diversamente. In entrambi i casi la lavorazione, che avviene secondo vari

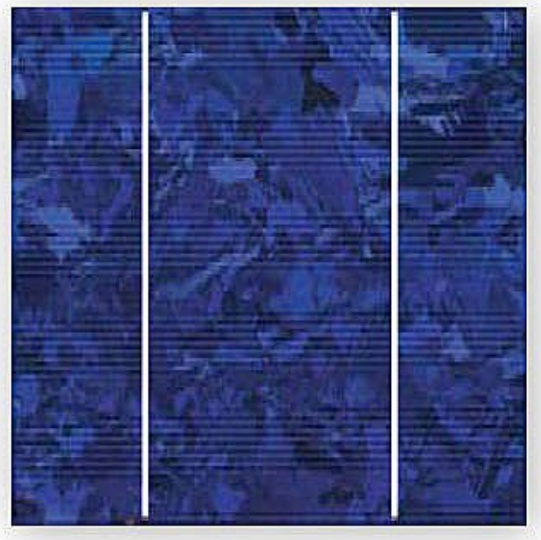
processi di lavorazione in forni appositi, consiste nella realizzazione di lingotti cristallini che vengono tagliati a fette sottili (spessori dell'ordine di  $10^2$  micron) dette wafers, delle dimensioni di circa  $156 \times 156 \text{ mm}^2$ . Sempre nei forni si eseguono operazioni di drogaggio che, applicate al wafer, consentono di ricavare la giunzione P-N, la quale viene poi collegata in superficie ad una sottile griglia metallica che funge da contatto elettrico.

I moduli al silicio cristallino sono attualmente la tipologia caratterizzata dal maggior rendimento, raggiungendo valori prossimi al 20% in fase di utilizzo, e da un costo che, soprattutto negli ultimi anni, è sceso notevolmente, rendendo questa tecnologia, la più diffusa.

Tra monocristallino e policristallino, lo scarto di efficienza è di circa qualche punto percentuale a favore del primo (20% per il monocristallino, e 16% per il policristallino), il quale, però, presenta una resa notevolmente inferiore quanto maggiore è il discostamento dalle condizioni standard STC.



**Figura 15 - Cella in silicio monocristallino**



**Figura 16 - Cella in silicio policristallino**

## **Celle a film sottile**

Oltre alle celle in silicio cristallino, ha assunto grande importanza la produzione di celle dette a film sottile (thin film cells).

Queste celle sono realizzate mediante la deposizione di films policristallini di spessore pari a circa 1 micron, che aderendo ad un substrato e trattati con opportune sostanze droganti, permettono di ricavare la cella con materiali differenti dal silicio, e costi bassi (soprattutto in termini di quantità di materiale usato, il cui spessore risulta notevolmente ridotto rispetto alle classiche celle cristalline). I supporti possono essere anche vetro, polimeri o altri materiali.

Le celle a film sottile sono però caratterizzate da rendimenti particolarmente bassi, circa la metà di quelle cristalline, ma presentano notevoli vantaggi a livello applicativo, che ne hanno favorito la diffusione in molti campi. Infatti essi sono particolarmente resistenti alle radiazioni (che hanno comunque un effetto dannoso a lungo termine sui materiali), hanno un assorbimento particolarmente elevato, che permette il loro impiego in condizioni climatiche in cui non prevale l'irraggiamento diretto, ma la radiazione diffusa, ovviando così a molte problematiche in fase di installazione (è possibile infatti il montaggio anche con pannelli poco inclinati o addirittura piani, e non bene orientati); inoltre, esse consentono la realizzazione di impianti integrati che risultano essere molto più gradevoli anche a livello estetico. Questi pannelli presentano inoltre, un buon funzionamento anche in condizioni distanti da quelle standard, a differenza dei moduli in silicio cristallino.

Infine, i moduli a film sottile ben si adattano a vari supporti di fissaggio, permettendo di ottenere differenti tipologie di pannelli adeguate a varie esigenze costruttive (anche in termini di leggerezza e dimensione).

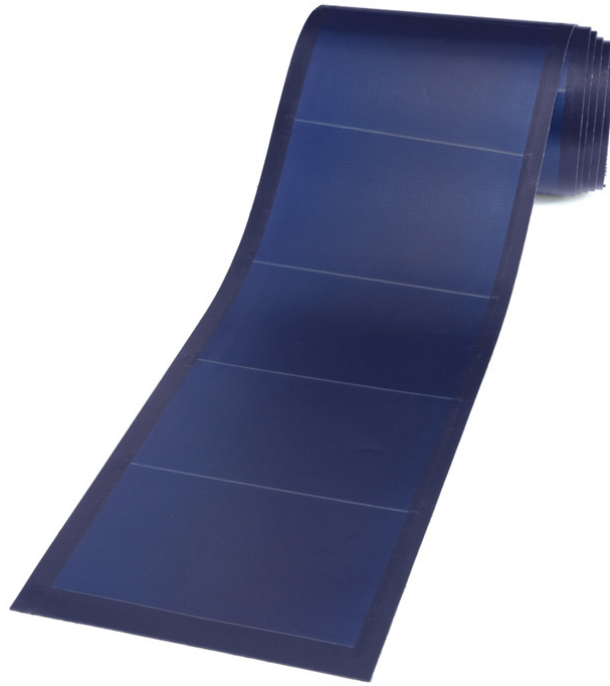


**Figura 17 - Moduli a film sottile**

### *Celle e materiali innovativi*

Il silicio può essere impiegato in forma di film sottile, allo stato amorfo anziché in forma cristallina; la sua struttura irregolare lo rende un materiale con scarse proprietà elettriche, ma dotato di una grande capacità di assorbimento della radiazione solare. Questa caratteristica permette di ottenere una cella fotovoltaica con un limitatissimo consumo di materiale e costi ridotti. L'unico vero problema a cui si è dovuto porre rimedio è quello della sua limitata resistenza alla radiazione solare, che lo porta al degrado in breve tempo. Uno degli accorgimenti più importanti che ne ha consentito l'applicazione è stato quello della disposizione del silicio amorfo in tripla giunzione. Si tratta in pratica di creare più celle sovrapposte, che permettono non solo di spartire la radiazione e diminuire l'effetto di degrado, ma di raggiungere anche efficienze più elevate (circa del 10%).

Una delle applicazioni più interessanti del silicio amorfo, è quella dell'utilizzo di supporti polimerici, come illustrato in figura 18, che consentono di ottenere veri e propri rotoli di pannelli fotovoltaici, applicabili facilmente su superfici curve, rendendo così possibile l'integrazione con la copertura.



**Figura 18 - Esempio di modulo in silicio amorfo preaccoppiato su guaina flessibile**

Lo sviluppo delle celle a film sottile ha permesso l'introduzione nel campo fotovoltaico di numerosi altri materiali come il tellururo di cadmio (CdTe), o le leghe CIS (diseleniuro di rame e indio) o CIGS (diseleniuro di rame, indio e gallio), o arseniuro di gallio (GaAs).

Quest'ultimo consente il raggiungimento di efficienze particolarmente elevate, in alcuni casi attorno al 40%, ma il suo costo elevato lo rende adatto unicamente in campi speciali come quello spaziale e dove il costo confrontato al rendimento (nello spazio la costante solare è molto più elevata poiché non filtrata dall'atmosfera) assume un ruolo marginale.

In questo momento la ricerca in campo fotovoltaico è orientata alla messa a punto di processi costruttivi sempre più economici, in grado di aumentare il rendimento del processo di conversione dell'energia solare in corrente elettrica; il rendimento, infatti, non è particolarmente elevato, poiché soltanto una piccola parte dello spettro solare viene sfruttata dagli elettroni che vengono eccitati, mentre il resto influisce poco (come descritto nel paragrafo sul funzionamento della cella). Le possibilità di risoluzione di questo

problema sono legate allo sviluppo di moduli a giunzione multipla, in grado di sfruttare le più componenti della radiazione solare, grazie a più giunzioni in materiali caratterizzati da energy gap differenti. Un'altra possibilità consiste nello sfruttare l'effetto della luminescenza per convertire l'energia del sole da uno spettro complesso a varie frequenze, in un'unica frequenza, in modo da poterlo assorbire interamente utilizzando un materiale con opportuno band gap.



### 1.3.1.3 Modulo fotovoltaico



**Figura 19 - Esempio di modulo fotovoltaico**

Un modulo fotovoltaico, o modulo PV, è composto da celle fotovoltaiche connesse tra loro elettricamente per fornire complessivamente una potenza maggiore; l'unione delle celle in strutture di tipo modulare inoltre le protegge dall'ambiente, facilita l'installazione e ripara dal pericolo di shock elettrici.

Più moduli possono essere collegati tra loro meccanicamente e formare grossi pannelli ancorabili al suolo o a vari supporti; più moduli collegati elettricamente in serie costituiscono una stringa e più stringhe collegate in parallelo, formano un campo fotovoltaico.

Il passaggio dalla singola cella al modulo nel suo complesso crea una serie di problematiche che non possono essere trascurate.

Uno dei fenomeni più frequenti è quello delle perdite per mismatch; questo accade quando all'interno di un modulo una cella si trova a operare in condizioni tali da produrre una potenza inferiore (ad esempio se questa riceve un irraggiamento minore delle altre a causa di un ombreggiamento). In questa situazione, essendo le celle connesse in serie, quella presa in esame si

comporta come un diodo che si oppone alla corrente prodotta dalle altre celle, provocando spesso un surriscaldamento che rischia di danneggiare il modulo (fenomeno della creazione di “hot-spot”).

Per ovviare a tale problematica i moduli sono dotati di diodi di by-pass che permettono di cortocircuitare la cella ombreggiata o danneggiata.

Anche tra le stringhe si può verificare il mismatch, con la formazione di correnti inverse che viaggiano dalla stringa con tensione maggiore a quella con tensione minore; il problema può essere risolto mediante l’inserimento di diodi.

Le celle che costituiscono il modulo vengono incapsulate con appositi sistemi di assemblaggio che:

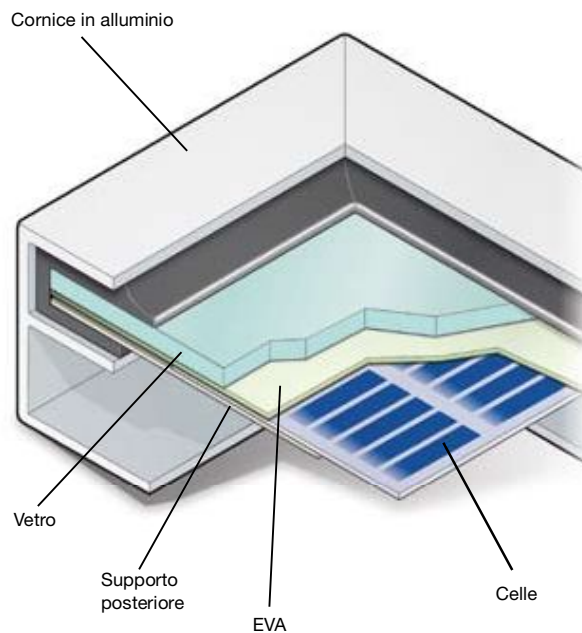
- isolano elettricamente le celle dall’esterno;
- proteggono le celle dagli agenti atmosferici e dalle sollecitazioni meccaniche;
- resistono ai raggi ultravioletti, alle basse temperature, agli sbalzi termici e all’abrasione;
- smaltiscono facilmente il calore per evitare l’aumento di temperatura delle celle.

I moduli fotovoltaici sono realizzati con sistemi differenti a seconda del produttore e della tipologia (basti pensare alla differenza tra moduli in wafer cristallino, o quelli a film sottile).

Quelli in silicio cristallino, che sono i più diffusi, presentano in genere:

- una lamina di protezione sul lato superiore esposto alla luce, dotata di elevata trasparenza (solitamente si usa il vetro);
- un materiale polimerico, di solito viene usato l’EVA (vinilacetato di etilene), di incapsulamento che evita il contatto diretto vetro-cella, elimina gli interstizi e isola elettricamente la cella;

- la cella stessa, dotata dei collegamenti elettrici;
- un substrato di supporto inferiore (solitamente vetro o plastica);
- una cornice metallica, usualmente in alluminio, in grado di consentire più facilmente il montaggio, oltre che proteggere il modulo.



**Figura 20 – Modulo fotovoltaico: la figura mostra i vari strati che compongono il pannello**

I produttori offrono garanzie sui moduli fotovoltaici di circa 20 anni e forniscono tutti i dati relativi alle caratteristiche di robustezza e resistenza del modulo. Il rendimento di un modulo fotovoltaico si ottiene mediante la seguente formula:

$$\eta = \frac{P_{mod}}{I_{stc}A_{mod}}$$

dove  $P_{mod}$  è la potenza nominale del modulo in Wp,  $I_{stc}$  è il valore di irraggiamento in condizioni standard, e  $A_{mod}$  è l'area del modulo.

I parametri validi per la cella sono analoghi a quelli del pannello, anche se essi assumono ovviamente valori diversi; per quel che riguarda l'efficienza in generale, si ha che il valore riferito al modulo è inferiore a quello della singola cella; ciò è dovuto alle perdite che si verificano nei collegamenti e a causa degli spazi tra una cella e l'altra che, per quanto esposti al sole, non partecipano alla conversione.

Come per le celle inoltre, l'efficienza del modulo cala in funzione dell'aumento della temperatura, per abbassamento della  $V_{oc}$ . Considerando un coefficiente di riduzione termico di 0,4% / °C si ha:

$$\eta_{eff} = \frac{\eta_{mod}[100 - 0,4(T_c - 25)]}{100}$$

dove  $\eta_{eff}$  è il rendimento effettivo,  $\eta_{mod}$  è il rendimento nominale del modulo e  $T_c$  rappresenta la temperatura di reale impiego.

Al fine di prevedere in maniera corretta le prestazioni di un pannello fotovoltaico, i costruttori riportano, oltre ai valori calcolati secondo le STC, valori più realistici, ottenuti tramite il parametro di NOCT (Nominal operating cell temperature), definito come la temperatura delle celle in condizioni di irraggiamento di 800 W/m<sup>2</sup>, spettro AM 1.5 e una temperatura ambiente di 20°C.

I moduli fotovoltaici sono sottoposti a una serie di prove (elettriche, termiche e meccaniche), che secondo le normative europee, permettono loro di ottenere certificati di qualità e ne rendono di fatto possibile la vendita e l'installazione. Questi certificati, con le relative garanzie, sono disponibili presso i costruttori.

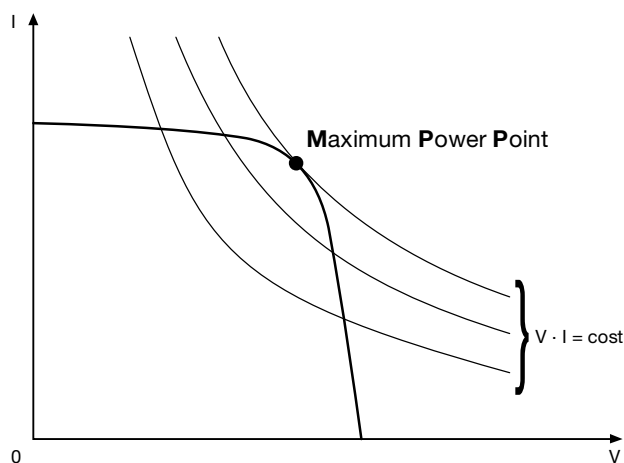
### 1.3.2 Inverter



**Figura 21 - Esempio di Inverter**

Il sistema di condizionamento e controllo della potenza prodotta dal generatore fotovoltaico è costituito da un inverter che trasforma la corrente continua in alternata, controllando la potenza in uscita per l'immissione nella rete attraverso un filtro interno all'inverter stesso.

La potenza fornita dal generatore dipende dal punto in cui esso riesce a lavorare all'interno della sua curva caratteristica, come visto in precedenza. Al fine di ottimizzare questo valore occorrerebbe adeguare il generatore al carico in modo da "controllare" il punto di lavoro ottimizzandolo. Per questo scopo gli inverter moderni sono dotati di un dispositivo denominato inseguitore del punto di massima potenza o MPPT (maximum power point tracking), il quale individua istante per istante la coppia di valori tensione-corrente del generatore per la quale si ottiene la massima potenza raggiungibile.



**Figura 22 - Rappresentazione grafica del punto di massima potenza**

Il punto di massima potenza corrisponde al punto di tangenza tra la curva  $IV = costante$  e la curva caratteristica per una determinata condizione ambientale (irraggiamento, temperatura...); il meccanismo è basato sull'uso di algoritmi che provocano ad intervalli regolari piccole variazioni di carico, che determinano scostamenti dei valori di tensione e corrente, valutando se il nuovo prodotto  $IV$  è maggiore o minore del precedente. In caso di aumento continuano la variazione nella direzione considerata, in caso contrario in senso opposto.

Gli inverter per il collegamento in rete devono riprodurre il più fedelmente possibile la tensione di rete, cercando quindi di massimizzare la produzione.

La scelta dell'inverter rappresenta un aspetto importante per l'efficacia dell'impianto, in quanto un suo dimensionamento errato può portare a notevoli perdite di produzione, nonché a possibili danni o guasti.

Una delle problematiche attuali consiste nella scelta del numero di inverter da adottare in un impianto; la tendenza degli ultimi anni è stata quella di preferire ad un unico apparecchio, l'uso di più dispositivi convertitori contemporaneamente, ciascuno assegnato ad una parte dell'impianto. Tale scelta comporta solitamente un costo più elevato, ma offre una maggiore sicurezza in caso di guasto, poiché permette comunque alla parte funzionante

del generatore fotovoltaico di produrre. Inoltre, è possibile, mediante l'uso di più inverter, ottimizzare la resa di impianti i cui pannelli si trovano orientati diversamente, poiché ogni inverter può seguire un sottocampo mediante un singolo algoritmo MPPT, opzione altrimenti irrealizzabile nel caso in cui sia in funzione un inverter singolo.

Nell'ultimo anno la tecnologia si sta evolvendo in direzione dei microinverter, convertitori di corrente di ridotte dimensioni ed incorporate nei pannelli, che consentirebbero ad ogni modulo di produrre corrente alternata indipendentemente dagli altri, nonché ottimizzare le produzioni in modo molto più efficace.

### 1.3.3 Cablaggio

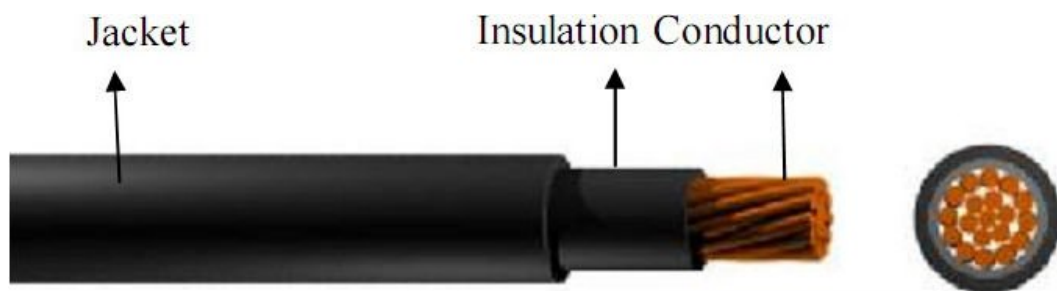


Figura 23 - Cavo solare

Il cablaggio di un impianto fotovoltaico non differisce in gran parte da quello usato per una normale rete elettrica, eccezion fatta per i cavi che collegano tra loro i moduli e in generale tutti quelli che si trovano a monte dell'inverter. Questi ultimi, infatti, si trovano a dover lavorare spesso esposti all'ambiente e quindi in condizioni estremamente sfavorevoli per oltre 20 anni. Si usano quindi in questo caso i cosiddetti cavi solari, adatti a sopportare elevata temperatura (70-80 °C), precipitazioni atmosferiche e radiazioni ultraviolette, se montati a vista. Si usano in genere cavi unipolari con isolamento doppio o rinforzato, in modo da ridurre al minimo il rischio di guasti e cortocircuiti, e

guaina di gomma (temperatura massima di funzionamento garantita a circa 90°C).

I cavi devono avere tensione nominale adeguata a quella dell'impianto; in corrente continua la tensione dell'impianto non deve superare del 50% quella nominale dei cavi (i dati si possono ricavare da tabelle fornite dai produttori). L'ottenimento di un buon impianto in termini di cablaggio incide sul rendimento del sistema nel complesso, a causa delle possibili perdite ohmiche che si generano inevitabilmente sui cavi in seguito al passaggio della corrente.

#### **1.3.4 Fissaggio dei moduli**

I moduli fotovoltaici hanno bisogno di strutture cui essere collegati rigidamente, per garantirne la funzione nel tempo.

Il sostegno deve essere correttamente dimensionato per resistere alla forza del vento e a eventuali sollecitazioni che potrebbero provocare il distacco dei moduli.

Nel caso in cui i pannelli vadano collocati a terra, il fissaggio al suolo avviene semplicemente mediante strutture in metallo che fungono da supporto ai moduli, a loro volta fissate a pali piantati nel terreno oppure zavorrati con pesi di calcestruzzo (come in figura 24).





**Figura 24 – Ancoraggio al suolo tramite zavorra dei supporti che sorreggono i pannelli**

Invece, nel caso in cui i pannelli siano collocati su un tetto, entrano in gioco una serie di fattori, spesso sottovalutati, ma di fondamentale importanza e che molto spesso possono diventare decisivi nella scelta stessa della tipologia di modulo da installare.

Bisogna infatti considerare che la scelta del modulo è sempre subordinata al contesto in cui esso si colloca; trattandosi della copertura di un tetto, occorre preoccuparsi che l'installazione di strutture e moduli non vada a comprometterne la funzione primaria. I fattori principali da tenere in considerazione sono l'inclinazione e l'orientamento della superficie, ma anche il carico che il tetto è in grado di sostenere, nonché la sua tipologia.

In alcuni casi particolari la scelta è anche legata a un aspetto estetico, per cui si scelgono pannelli e fissaggi che consentono una migliore integrazione dell'impianto nel contesto in cui è inserito.

In generale possiamo distinguere tra tetti piani o a falde.

Nel primo caso i moduli possono essere incollati direttamente su membrana polimerica a completamento della copertura, sfruttando la tecnologia a film sottile (che inoltre ben si presta nel caso di superfici piane non inclinate in condizioni favorevoli alla radiazione diretta e di solito soggette a temperature maggiori), oppure fissati a tralicci metallici (che permettono di regolare l'orientamento) a loro volta infissi nel solaio o appoggiati e zavorrati.



**Figura 25 - Applicazione per incollaggio su superfici curve, di moduli in silicio amorfo**

Nel caso di tetti a falde le possibilità variano generalmente in funzione di coperture a tegole (o coppi) o a lastre metalliche grecate od in fibrocemento ondulato.

Per le tegole solitamente si inseriscono staffe tassellate al solaio che sporgono da sotto la tegola e consentono l'installazione delle strutture di sostegno in alluminio. Per coperture a lastra, salvo casi particolari di lamiera già



predisposte all'incastro di moduli, i sostegni sono direttamente avvitati sulle teste delle greche.



**Figura 26 - Fissaggio dei pannelli tramite profili in alluminio**

### **1.3.5 Dispositivi elettrici**

Oltre al generatore fotovoltaico e all'inverter per la conversione dell'energia, sono presenti nell'impianto molti altri componenti, tipici di un impianto elettrico, che consentono l'allacciamento in sicurezza alla rete nazionale.

Si tratta di dispositivi che permettono di garantire la salvaguardia dell'impianto e degli utenti in caso di malfunzionamenti, guasti, riparazioni, o errori da parte degli operatori.

Un'analisi completa può essere effettuata solo caso per caso, poiché gran parte degli elementi che costituiscono l'impianto elettrico sono gestiti da normative che variano in funzione della taglia dell'impianto, così come dalle condizioni locali in cui questo si colloca.

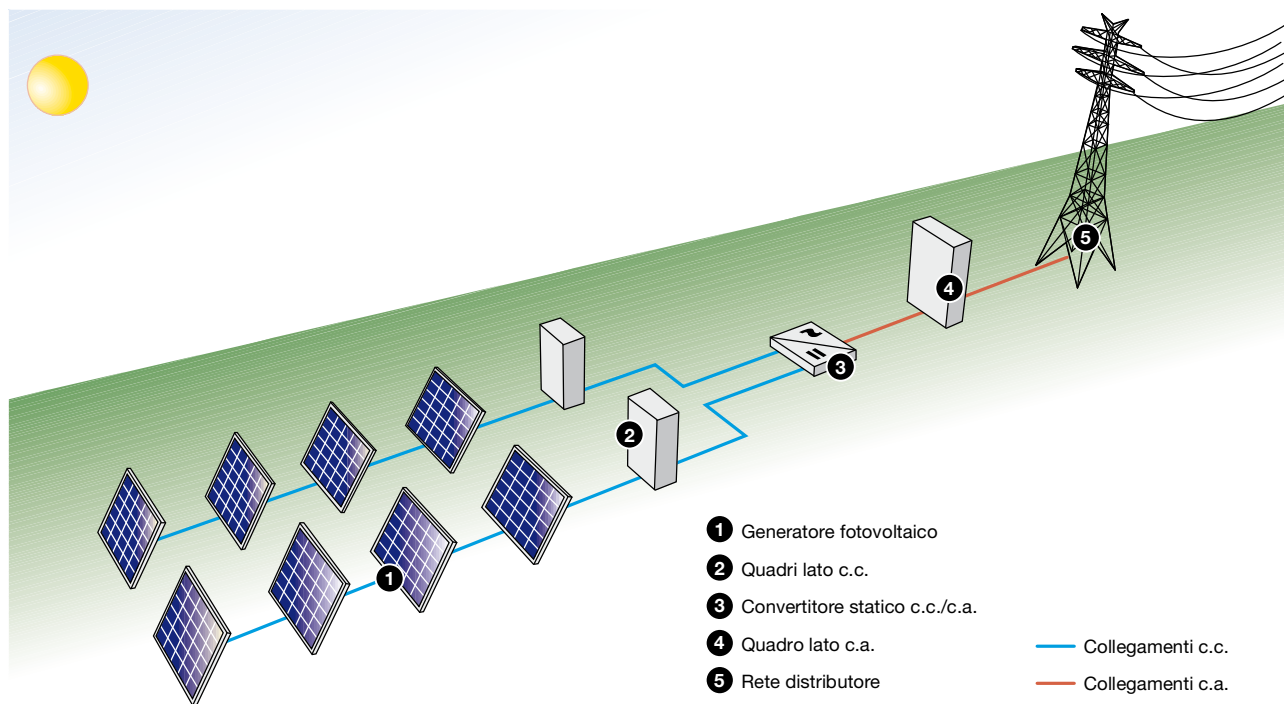
I più importanti sono:

- sezionatori di corrente: permettono di staccare manualmente il collegamento tra due parti dell'impianto;
- scaricatori di corrente: si attivano in caso di grandi sovraccarichi di corrente, dovuti per esempio ad un fulmine, e scaricano la corrente in eccesso a terra;
- interruttori magnetici, termici e differenziali: sono dispositivi che staccano automaticamente il collegamento tra due parti dell'impianto in caso di sovraccarichi di tensione o corrente, permettendo di proteggere sia i componenti dell'impianto, che eventuali operatori;
- trasformatore: (non necessario per impianti di taglia inferiore ai 20 kWp) protegge la linea in cui si inserisce la corrente prodotta dall'impianto;
- interfaccia: permette di scollegare parti dell'impianto sulla scelta dell'operatore, garantendo così la sicurezza nel caso di manutenzioni.

### **1.3.6 Dispositivi di monitoraggio**

Allo stato dell'arte è possibile e abbastanza comune, soprattutto nel caso di impianti da parecchi kWp installati, allacciare all'impianto dispositivi in grado di monitorarne il corretto funzionamento.

In generale questi strumenti consentono di visualizzare via internet tutta la produzione dell'impianto, giornaliera, mensile e annuale; esistono tipologie di apparecchi in grado di valutare la produzione della singola stringa di pannelli, e informare l'utente in caso di malfunzionamento mediante e-mail o sms.



**Figura 27 – Schema complessivo di un impianto fotovoltaico**

## 1.4 Valutazione energetica

Nell'installazione di impianti per la produzione di energia, è fondamentale conoscere le cause che possono generare perdite nel rendimento globale, al fine di ottenere stime più esatte della produzione, e ottimizzare la realizzazione dell'impianto stesso.

### 1.4.1 Variazione dell'energia prodotta

A livello di generatore fotovoltaico, l'energia prodotta assume valori spesso diversi da quelli teorici se non si tengono conto di fattori importanti e dai quali non si può prescindere nel valutare la resa dell'impianto; tra questi i più rilevanti sono:

- l'irraggiamento;
- la temperatura dei moduli;

- l'ombreggiamento e l'imbrattamento.

#### **1.4.1.1 Irraggiamento**

L'irraggiamento, o irradianza solare, consiste ovviamente nell'aspetto predominante per valutare la resa dell'impianto; esso influisce sulla curva caratteristica delle celle, variandone la corrente prodotta. Al diminuire dell'irradianza, diminuisce la corrente generata; in questa situazione l'efficienza del modulo rimane la stessa.

E' importante notare come l'impianto fotovoltaico sia in grado di produrre costantemente energia finché vi sia radiazione disponibile, anche in condizioni nuvolose o poco soleggiate.

La radiazione proveniente dal sole può essere:

- diretta, ossia corrispondente all'energia che proviene direttamente dal sole;
- diffusa, ossia che subisce un processo di rifrazione e riflessione attraverso le molecole dei gas presenti nell'aria, e che si propaga uniformemente lungo ogni direzione;
- riflessa, corrispondente alla parte di radiazione che viene riflessa dal terreno o da oggetti particolari.

Secondo la situazione climatica e ambientale in cui si trova l'impianto, queste componenti assumono un ruolo diverso, e risulta quindi conveniente valutarne il rispettivo peso prima di effettuare ogni scelta in relazione al progetto del sistema fotovoltaico.

La riflessione dell'ambiente è sintetizzata mediante un coefficiente detto di albedo, il cui valore varia in funzione del terreno e della zona circostante, e che assume di solito un valore pari a 0,2.

### **1.4.1.2 Temperatura**

Come visto in precedenza, la temperatura ha una grande influenza sul valore della tensione a circuito aperto della cella (soprattutto per i moduli in silicio cristallino, molto meno invece per quelli a film sottile).

L'effetto di diminuzione della tensione a circuito aperto in caso di aumento della temperatura prende il nome di derating termico del modulo.

Gli sbalzi termici, inoltre, sono in grado di danneggiare il pannello, e vanno eliminati il più possibile cercando di valutare l'installazione dei moduli in zone di maggior ventilazione. Per comprendere l'importanza del fenomeno bisogna notare come in condizioni ambientali di temperatura attorno ai 30° C, come può avvenire d'estate nel nostro ambiente, i pannelli possano raggiungere temperature molto elevate, nell'ordine dei 60°C circa.

### **1.4.1.3 Ombreggiamento ed imbrattamento**

Come descritto in precedenza, un impianto fotovoltaico funziona bene se si trova in condizioni omogenee d'irraggiamento, mentre nel caso una sua parte sia oscurata, possono generarsi una serie di fenomeni elettrici (mismatch, hotspot) che rischiano di comprometterne il funzionamento.

Per evitare che ciò accada, oltre ad accorgimenti tecnici a livello di modulo, è importante eseguire uno studio approfondito relativamente all'andamento delle ombre che sono proiettate sulla superficie dell'impianto durante l'anno.

Una valutazione approssimativa si può eseguire mediante lo studio delle ombre nelle ore centrali del solstizio d'inverno, giorno in cui il sole è più basso sull'orizzonte.

Un'ulteriore causa di riduzione della produzione è rappresentata dal deposito di sostanze di varia natura sulla superficie dei moduli, che può diminuire significativamente il coefficiente di trasmissione solare. Questo fenomeno è

particolarmente problematico in ambiente urbano, in cui l'inquinamento dell'aria porta spesso al deposito di polveri. Solitamente le precipitazioni costituiscono un sistema sufficiente per mantenere la pulizia dei moduli, ma è comunque consigliabile mantenere un buon livello di pulizia dell'impianto mediante semplici lavaggi ad acqua, da compiersi nelle ore mattutine per evitare di creare shock termici nei moduli.

### **1.4.2 Balance of system**

Il BOS o balance of system, rappresenta l'insieme degli elementi dell'impianto fotovoltaico; poiché l'insieme dei singoli rendimenti e le perdite connesse alla loro interazione determinano il rendimento complessivo del sistema, l'analisi del BOS risulta fondamentale ai fini di una corretta interpretazione del funzionamento dell'impianto.

Un modo particolarmente efficace per valutare il rendimento di un sistema fotovoltaico è la valutazione del suo PR (performance ratio): si tratta di considerare l'energia che è stata irraggiata dal sole in un metro quadrato di superficie durante un certo intervallo di tempo (tipicamente un anno); per fare ciò occorre di disporre di dati meteorologici ottenibili presso le stazioni ARPA oppure mediante un piranometro vincolato rigidamente ad una superficie fissa.

Il PR di un impianto, per un dato periodo di tempo, è il rapporto tra la produzione effettiva di kWh e la produzione teorica che avrebbe avuto il generatore fotovoltaico se avesse funzionato in condizioni standard per un numero equivalente di ore numericamente pari all'energia per metro quadrato irradiata nello stesso periodo di tempo dal Sole, misurata in kWh.

Se per esempio in un anno si registra un valore di energia per metro quadrato pari a 1.500 kWh, possiamo immaginare che l'impianto in considerazione abbia lavorato per 1.500 ore in condizioni standard (poiché in condizioni



standard l'irraggiamento è di  $1.000 \text{ W/m}^2$ ); è immediato a questo punto rapportare la produzione effettiva dell'impianto nel medesimo anno, con il prodotto tra il valore di potenza nominale complessiva del generatore per le 1.500 ore considerate.

Il PR per un impianto installato correttamente varia tra circa il 75% e l'80%.

Questo sistema tuttavia non permette di tenere conto del decadimento del rendimento dovuto alla temperatura e al passaggio da una condizione d'irraggiamento a un'altra.

Per compiere un'analisi approfondita dell'impianto occorre anche valutarne le perdite in ogni suo componente, in modo da stabilire il rendimento complessivo del sistema; un'operazione di questo tipo è stata portata a termine per l'impianto preso in considerazione nella prova sperimentale.