

## LA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA (APPROFONDIMENTI TECNICI)

### LA RADIAZIONE SOLARE

La *radiazione solare* è l'energia elettromagnetica emessa dai processi di fusione dell'idrogeno contenuto nel sole.

L'intensità e la distribuzione spettrale della radiazione solare che arriva sulla superficie terrestre dipendono dalla composizione dell'atmosfera: al suolo l'energia solare è concentrata nell'intervallo di lunghezza d'onda 0,2 - 2,5 micrometri:

0,2 - 0,38 micrometri = ultravioletto  
(6,4% dell'energia totale compresa nello spettro)

0,38 - 0,78 micrometri = visibile (48%)

0,78 - 10 micrometri = infrarosso  
(45,6%)



La zona utile per le celle fotovoltaiche di silicio cristallino comincia a 0,35 micrometri fino a tutto l'infrarosso compreso.

L'intensità massima dell'energia solare è compresa tra 0,5 e 0,55 micrometri.

Irraggiamento extraterrestre ("costante solare"):  $1.367 \text{ W/mq} \pm 3,3 \%$  (per la diversa distanza Terra - Sole)

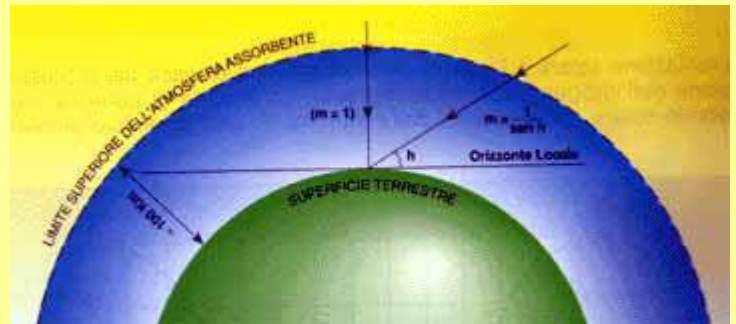
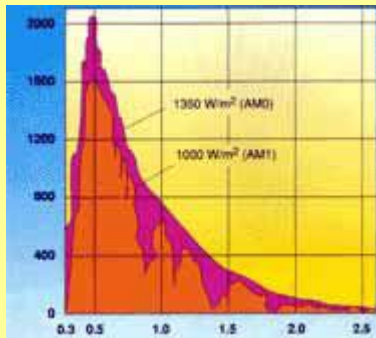
Per considerare gli effetti dell'atmosfera, si è definita la cosiddetta massa d'aria unitaria AM1 (Air Mass One), che rappresenta lo spessore di atmosfera standard attraversato in direzione perpendicolare alla superficie terrestre e misurato al livello del mare.

$AM = (1 - 0,1 * \text{altitudine}) / \sin HS$  approssimabile a:  $1 / \sin HS$  essendo HS l'angolo di elevazione solare (angolo tra la linea del sole e il piano orizzontale)

Air Mass fuori dall'atmosfera:  $AM = 0$

Con un angolo di elevazione solare HS pari a  $90^\circ$ :  $AM = 1$

Con HS pari a 42°: AM = 1,5 (è questo AM che viene considerato nei test di laboratorio dei moduli fotovoltaici, per la definizione della potenza di targa).



Confrontando lo spettro della radiazione solare al suolo in condizioni AM1 con lo spettro della radiazione al di fuori dell'atmosfera, in condizioni AM0, si può notare nello spettro relativo alla condizione AM1 la presenza di numerose buche, non presenti nello spettro ad AM0, dovute: 1) all'assorbimento causato dalle molecole di vapor d'acqua e d'aria e dal pulviscolo atmosferico e 2) alla riflessione nello spazio.

Irraggiamento solare globale = Diretto + Diffuso + Riflesso (= 1.000  $W/m^2$ ) D'inverno il diffuso è molto maggiore in percentuale.

La radiazione solare diffusa, su base annua, è pari al 55% di quella globale.

Nei calcoli di dimensionamento dei sistemi solari fotovoltaici spesso è opportuno considerare il coefficiente di albedo, che misura la riflessione data dal suolo. Tale coefficiente dipende quindi dal tipo di suolo.

Alcuni esempi:

Erba: 0,15 - 0,25

Neve fresca: 0,82

Asfalto secco: 0,09 - 0,15

L'intensità della radiazione solare al suolo dipende dall'angolo d'inclinazione della radiazione stessa: minore è l'angolo che i raggi del sole formano con una superficie orizzontale e maggiore è lo spessore di atmosfera che essi devono attraversare, con una conseguente minore radiazione che raggiunge la superficie.

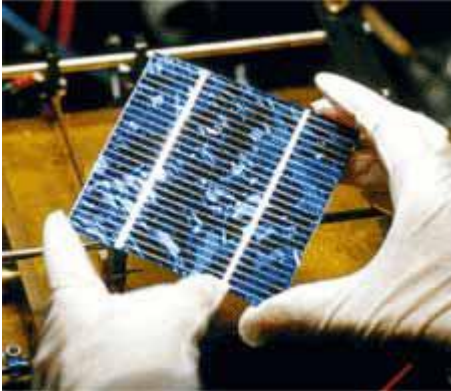
Sistemi di misura (solarimetri):

- piranometro: 2 termocoppie (una a contatto con l'atmosfera, l'altra sul retro, al buio).  
La differenza di tensione tra le 2 determina l'irraggiamento, preciso (1%).
- celle di riferimento: si basa su una piccola cella fotovoltaica, precisione inferiore (5%).

Tablelle di irraggiamento solare (diffuso + diretto) --> kWh/mq giorno : da avere per ogni mese dell'anno, per effettuare correttamente il dimensionamento dell'impianto a seconda del tipo di utilizzo.

Alle nostre latitudini, l'inclinazione ottimale del piano dei moduli (o dei collettori nel caso del termico) è pari a circa  $35^\circ$ , tale da massimizzare l'energia captata nell'arco dell'anno. Nel caso in cui l'utilizzo del sistema sia prevalentemente nel periodo invernale, occorrerà applicare un'inclinazione di  $55^\circ - 60^\circ$ . Questi angoli possono cambiare da località a località, sebbene ci si trovi alla stessa latitudine, a causa della variabilità della componente diretta e diffusa che si ha nelle diverse zone.

## LA TECNOLOGIA DEL FOTOVOLTAICO



### *La cella*

La conversione della radiazione solare in una corrente di elettroni avviene nella cella fotovoltaica, un dispositivo costituito da una sottile fetta di materiale semiconduttore, molto spesso silicio, opportunamente trattata.

Tale trattamento è caratterizzato da diversi processi chimici, tra i quali si hanno i cosiddetti "drogaggi". Inserendo nella struttura cristallina del silicio delle impurità, cioè atomi di boro e fosforo, si genera un campo elettrico e si rendono anche disponibili le cariche necessarie alla formazione della corrente elettrica. Questa si crea quando la cella, le cui due facce sono collegate ad un utilizzatore, è esposta alla luce.

L'energia che si può poi sfruttare dipende dalle caratteristiche del materiale di cui è costituita la cella : l'efficienza di conversione (percentuale di energia contenuta nelle radiazioni solari che viene trasformata in energia elettrica disponibile ai morsetti) per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 13 % e il 17 %, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 32,5 %.

In pratica la tipica cella fotovoltaica ha uno spessore complessivo compreso tra 0,25 e 0,35 mm ed è costituita da silicio mono o multicristallino. Essa, generalmente di forma quadrata, ha una superficie compresa tra 100 e 225 mq e produce, con un irraggiamento di 1 kW/mq ad una temperatura di 25°C, una corrente compresa tra i 3 e i 4 A e una tensione di circa 0,5 V, con una potenza corrispondente di 1,5 - 2 Wp.

### *Il watt di picco*

Poiché la potenza di una cella fotovoltaica varia al variare della sua temperatura e della radiazione, per poter fare dei confronti sono state definite delle condizioni standard di riferimento, che originano il cosiddetto watt di picco (Wp), relativo alla potenza fornita dalla cella alla temperatura di 25°C sotto una radiazione di 1.000 W/mq e in condizioni di AM1,5.

Oltre al silicio di tipo cristallino, ultimamente si nota un forte interesse, da parte di diverse aziende produttrici, a realizzare linee di produzione di moduli basati sul silicio amorfo. Con l'amorfo, in realtà, non si può parlare di celle, in quanto si tratta di deposizioni di silicio (appunto allo stato amorfo) su superfici che possono anche essere ampie.

Il silicio amorfo è presente sul mercato già da diversi anni, ma fino ad ora non si era guadagnato una quota di mercato significativa, soprattutto a causa dei dubbi esistenti sulla sua stabilità nel tempo : col passare degli anni spesso si verificava una riduzione delle prestazioni. Ecco che l'amorfo veniva (e viene ancora oggi) usato soprattutto per applicazioni "indoor", cioè per alimentare piccoli utilizzatori, come calcolatrici tascabili, orologi, gadgets vari...

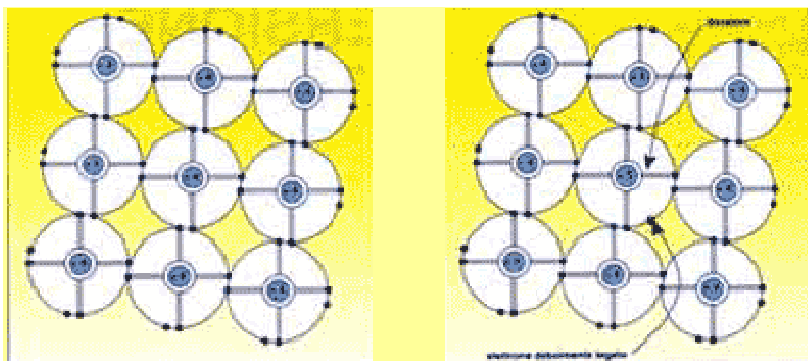
Di recente si è messa a punto una tecnologia produttiva che realizza più strati di silicio amorfo, la cosiddetta "eterogiunzione", che sembra risolvere i passati problemi di stabilità.

Per quanto riguarda il costo, il tradizionale silicio amorfo presenta costi minori rispetto al silicio cristallino (mono o multi), mentre l'amorfo a due o tre giunzioni necessita di ulteriori riduzioni di costo affinché possa diffondersi su larga scala.

## LA "FISICA" DEL PROCESSO FOTOVOLTAICO

La conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica, realizzata con la cella fotovoltaica, utilizza il fenomeno fisico dell'interazione della radiazione luminosa con gli elettroni di valenza nei materiali semiconduttori, denominato effetto fotovoltaico. Qualunque sia il materiale impiegato, il meccanismo con cui la cella trasforma la luce solare in energia elettrica è essenzialmente lo stesso.

Consideriamo per semplicità il caso di una convenzionale cella fotovoltaica di silicio cristallino.

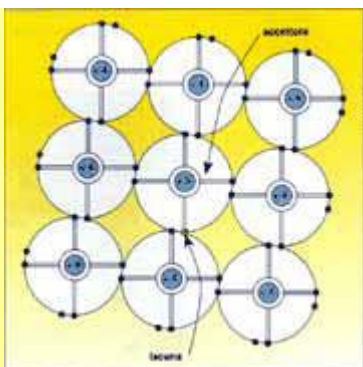


Normalmente l'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali sono elettroni di valenza, che quindi possono partecipare alle interazioni con altri atomi, sia di silicio sia di altri elementi.

Due atomi affiancati di un cristallo di silicio puro hanno in comune una coppia di elettroni, uno dei quali appartenente all'atomo considerato e l'altro appartenente all'atomo vicino.

Esiste quindi un forte legame elettrostatico fra un elettrone e i due atomi che esso contribuisce a tenere uniti. Tale legame può essere però spezzato da una certa quantità di energia : 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. Quando passa alla banda di conduzione, l'elettrone si lascia dietro una "buca", cioè una lacuna dove manca un elettrone. Un elettrone vicino può andare facilmente a riempire la buca, scambiandosi così di posto con essa.

Per sfruttare l'elettricità è necessario creare un moto coerente di elettroni (e di buche), 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. In pratica questa condizione si ottiene immettendo piccole quantità di atomi di boro (carichi positivamente) e di fosforo (carichi negativamente) nel reticolo di silicio, ovvero drogando il semiconduttore. L'attrazione elettrostatica fra le due specie atomiche crea un campo elettrico fisso che dà alla cella la struttura detta "a diodo", in cui il passaggio della corrente, costituita da portatori di carica liberi, per esempio elettroni, è ostacolato in una direzione e facilitato in quella opposta. La spiegazione di tale fenomeno si può esemplificare come segue.



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, detto "di valenza", 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.

Affacciando 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 che separa gli elettroni in eccesso generati

dall'assorbimento della luce dalle rispettive buche, spingendoli in direzioni opposte (gli elettroni verso la zona N e le buche verso la zona P) in modo che un circuito esterno possa raccogliere la corrente così generata.

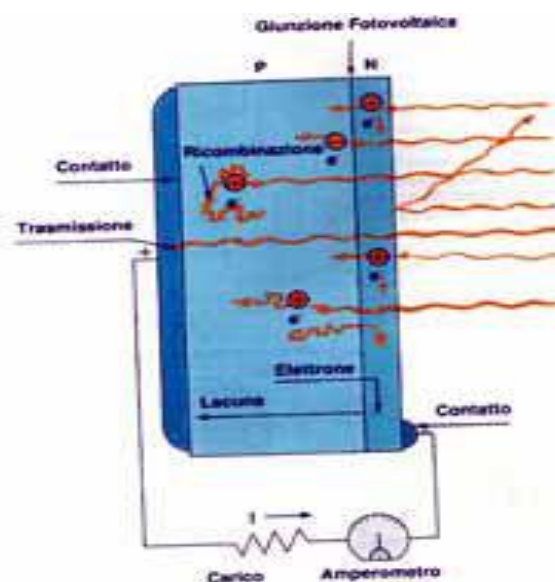
E' importante che il campo "incorporato" sia ubicato il più vicino possibile alla regione del dispositivo che assorbe la luce. I fotoni della luce che dispongono di sufficiente energia possono strappare un elettrone da uno stato legato ed elevarlo ad uno stato libero nella banda di conduzione del materiale.

Si ha così la produzione di due portatori di carica liberi: l'elettrone libero, nella banda di conduzione, e la buca libera, nella banda di valenza.

La conversione da luce a energia elettrica effettuata dalla cella fotovoltaica avviene essenzialmente perché questi portatori di carica liberi, generati dalla luce, sono spinti in direzioni opposte dal campo elettrico incorporato.

Una volta attraversato il campo, gli elettroni liberi non tornano più indietro, perché il campo, agendo come un diodo, impedisce loro di invertire la marcia.

Perciò, quando la luce incide sulla cella fotovoltaica, le cariche positive sono spinte in numero crescente verso la parte superiore della cella e le cariche negative verso quella inferiore, o viceversa, a seconda del tipo di cella. Se la parte inferiore e quella superiore sono collegate da un conduttore, le cariche libere lo attraversano e si osserva una corrente elettrica. Fino a quando la cella resta esposta alla luce, l'elettricità fluisce con regolarità sotto forma di corrente continua.

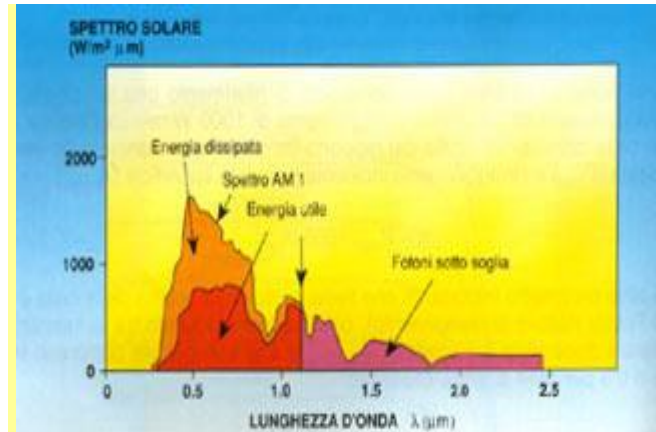


Di tutta l'energia che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti.

L'efficienza di conversione per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 13 % e il 17%, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 32,5%.

I motivi di tale bassa efficienza sono molteplici e possono essere raggruppati in quattro categorie:

- *riflessione*: non tutti i fotoni che incidono sulla cella penetrano al suo interno, dato che in parte vengono riflessi dalla superficie della cella e in parte incidono sulla griglia metallica dei contatti;
- *fotoni troppo o poco energetici*: per rompere il legame tra elettrone e nucleo è necessaria una certa energia, e non tutti i fotoni incidenti possiedono energia sufficiente. D'altra parte alcuni fotoni troppo energetici generano coppie elettrone-lacuna, dissipando in calore l'energia eccedente quella necessaria a staccare l'elettrone dal nucleo.

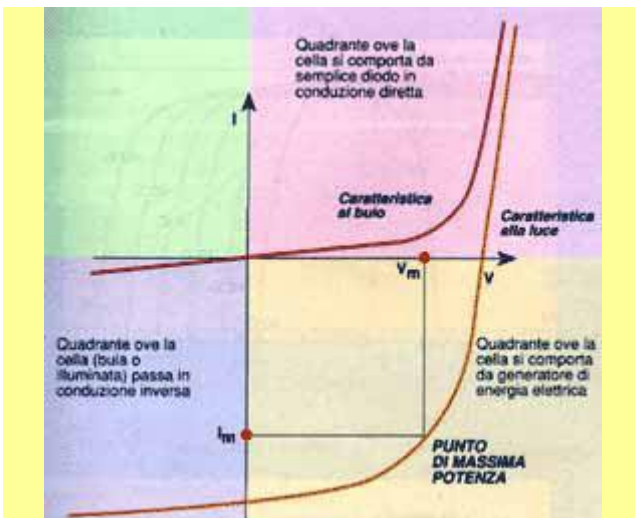


Lo spettro solare AM1.

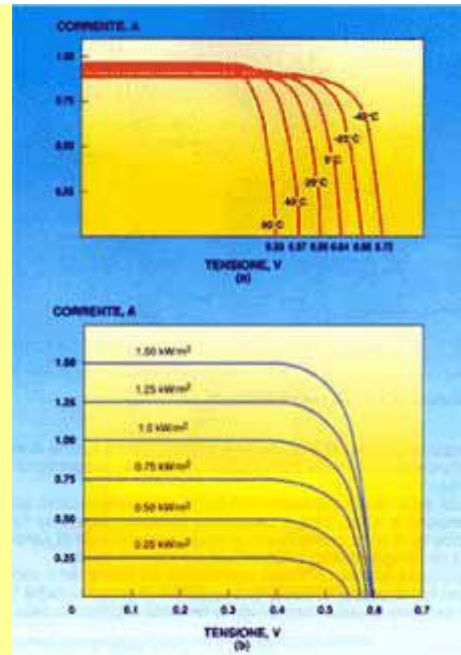
- *ricombinazione*: non tutte le coppie elettrone-lacuna generate vengono raccolte dal campo elettrico di giunzione e inviate al carico esterno, dato che nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno opposto e quindi ricombinarsi;
- *resistenze parassite*: le cariche generate e raccolte nella zona di svuotamento devono essere inviate all'esterno. L'operazione di raccolta viene effettuata dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra silicio e alluminio dei contatti, resta una certa resistenza all'interfaccia, che provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico. Nel caso di celle al silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente diminuita a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, ancor più nel caso di celle al silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi.

## LA CARATTERISTICA ELETTRICA DELLE CELLE SOLARI

Si è già ricordato che la cella fotovoltaica è sostanzialmente un diodo di grande superficie. Esponendola alla radiazione solare, la cella si comporta come un generatore di corrente, il cui funzionamento può essere descritto per mezzo della caratteristica tensione-corrente:



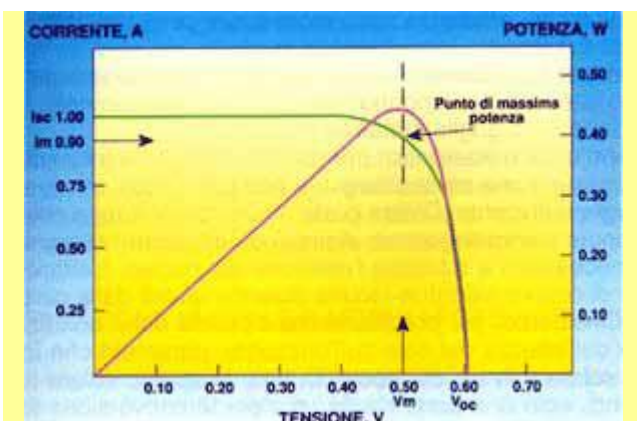
Caratteristica tensione-corrente di una cella solare.



Andamento della caratteristica elettrica in funzione della temperatura (a) e della radiazione solare (b).

In generale la caratteristica di una cella fotovoltaica è funzione di tre variabili fondamentali: intensità della radiazione solare, temperatura e area della cella. L'intensità della radiazione solare non ha un effetto significativo sul valore della tensione a vuoto; viceversa l'intensità della corrente di corto circuito varia in modo proporzionale al variare dell'intensità dell'irraggiamento, crescendo al crescere di questo.

La temperatura non ha un effetto significativo sul valore della corrente di corto circuito; al contrario, esiste una relazione di proporzionalità tra questa e la tensione a vuoto, diminuendo la tensione al crescere della temperatura. L'area della cella non ha alcun effetto sul valore della tensione; viceversa esiste una diretta proporzionalità tra questa e la corrente disponibile.



Caratteristica elettrica di una cella solare e andamento della potenza.

In condizioni di corto circuito la corrente generata è massima ( $I_{sc}$ ), mentre in condizioni di circuito aperto è massima la tensione ( $V_{oc}$ ). In condizioni di circuito aperto e di corto circuito la potenza estraibile sarà nulla, poichè nella relazione  $P = V \times I$  sarà nulla la corrente nel primo caso e la tensione nel secondo. Negli altri punti della caratteristica all'aumentare della tensione aumenta la potenza, raggiungendo quindi un massimo e diminuendo repentinamente in prossimità della  $V_{oc}$ .

### LE CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEI DIVERSI MATERIALI

	Si mono	Si multi	Si amorfo	GaAs	CdTe	CIS (CULNSe2)
Rendimento cella	14-17%	12-14%	4-6% singolo 7-10% tandem	32,5% (lab.)	10%	12%
Vantaggi	Alto rendimento. Stabilità nel tempo. Tecnologia affidabile.	Buon rendimento. Minor costo. Fabbricazione più semplice. Miglior occupazione dello spazio (celle quadrate).	Costo minore. Minore materiale ed energia per la fabbricazione. Buon rendimento con basso irraggiamento. Struttura flessibile.	Alta resistenza alle alte temperature. (adatta per i concentratori solari)	Basso costo.	Molto stabile.
Svantaggi	Costi elevati di produzione. Maggiore quantità di materiale per la produzione.	Complessità di produzione. Sensibilità alle impurità.	Basso rendimento rispetto alle altre tecnologie. Degrado iniziale. Instabilità negli anni.	Tossicità dei materiali. Scarsa disponibilità dei componenti.	Tossicità dei materiali. Scarsa disponibilità dei componenti.	Tossicità dei materiali (Cd).

## LA PRODUZIONE DELLE CELLE FOTOVOLTAICHE

I processi di produzione delle celle fotovoltaiche sono diversi a seconda del tipo di cella che s'intende realizzare.

Le differenze maggiori si hanno nella formazione della fetta di silicio, denominata "wafer", che è la struttura principale sulla quale verranno eseguiti diversi trattamenti, specialmente di natura chimica, che porteranno alla creazione della vera e propria cella.

Il wafer di monocristallo si produce con il metodo Czochralsky, basato sulla cristallizzazione di un "seme" di materiale molto puro, che viene immerso nel silicio liquido e quindi estratto e raffreddato lentamente per ottenere un "lingotto" di monocristallo, che avrà forma cilindrica (da 13 a 30 cm di diametro e 200 cm di lunghezza). Questo verrà drogato "P" mediante l'aggiunta di boro. I lingotti vengono quindi affettati in wafer aventi uno spessore compreso tra i 250 e i 350 micrometri.

Il wafer di multicristallo si origina invece dalla fusione e successiva ricristallizzazione del silicio di scarto dell'industria elettronica ("scraps" di silicio). Da questa fusione si ottiene un "pane" che viene tagliato verticalmente in lingotti con forma di parallelepipedo. Un successivo taglio orizzontale porta alla creazione di fette aventi uno spessore simile a quello delle celle di monocristallo (250 - 350 micrometri). Rispetto al monocristallo, il wafer di multicristallo consente efficienze comunque interessanti a costi inferiori.

Perché il wafer diventi una vera e propria cella fotovoltaica, occorre (sia per il mono che per il multicristallo) :

- "pulirlo" mediante un attacco in soda ;
- introdurre nel materiale atomi di fosforo (è il drogaggio di tipo "N"), affinché si realizzi la "giunzione p-n". Questo avviene facendo passare lentamente le fette all'interno di un forno, che "diffonde" nel materiale acido ortofosforico, contenente appunto gli atomi di fosforo desiderati ;
- dopo aver applicato un sottile strato di antiriflesso (biossido di titanio,  $TiO_2$ ), si realizzano, per serigrafia o elettrodeposizione, i contatti elettrici anteriori (una griglia metallica che raccoglierà le cariche elettriche) e posteriori (una superficie continua, sempre metallica) ;
- a questo punto la cella viene "testata" mediante una simulazione delle condizioni standard di insolazione ( $1000 \text{ W/m}^2$  a  $25^\circ\text{C}$  con spettro AM1,5), per poterla

classificare e quindi raggruppare insieme a celle aventi analoghe caratteristiche elettriche. Questo passaggio è molto importante per evitare di realizzare dei moduli con celle molto diverse tra di loro, che porterebbero ad una drastica riduzione delle prestazioni dell'intero modulo fotovoltaico.

## **L'ASSEMBLAGGIO DEI MODULI**

Moduli oggi molto comuni sono costituiti da 36 celle in serie, che permettono l'accoppiamento con gli accumulatori da 12 Vc.c. nominali. Per ottenere i moduli, le celle vengono collegate e saldate tra loro mediante terminali sui contatti anteriori e posteriori (in sequenza N-P-N-P-N...) in modo da formare le stringhe.

Si realizza quindi un sandwich avente come parte centrale il piano della cella e intorno, andando dall'esterno verso l'interno, una lastra di fibra di vetro dotata di ottima trasmittanza e buona resistenza meccanica, seguita da un foglio sigillante di EVA (acetato vinil-etilenico) che permette l'isolamento dielettrico dell'adiacente piano delle celle, seguito posteriormente da un secondo foglio di EVA e da un'altra lastra di vetro o un rivestimento isolante in tedlar.

Il sandwich è quindi scaldato in un forno a circa 100°C, temperatura alla quale i componenti si sigillano tra loro, l'EVA passa da traslucido a trasparente e si elimina l'aria residua interna, che potrebbe provocare corrosione a causa del vapor acqueo presente.

Si fissa infine il sandwich così trattato in una cornice d'alluminio estruso anodizzato (per resistere alla corrosione) e si dispone la cassetta di giunzione.

## **ALCUNE DEFINIZIONI**

### **STC (Standard Test Conditions)**

G incidente = 1.000 W/mq

T moduli = 25°C

Spettro = 1,5 AM

Vento = 0 m/s

### **NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)**

G incidente = 800 W/mq

T aria = 20°C

Vento = 1 m/s

NOCT tipico = 45 - 50°C

Esempio:

Tipo di modulo	Pnom. [Wp]	I <sub>mpp</sub> [A]	I <sub>cc</sub> [A]	V <sub>mpp</sub> [V]	V <sub>o</sub> [V]
Sharp ND-L3E6E	123	7,16	8,12	17,2	21,3
Sharp NE-L5E2E	125	4,80	5,46	26,0	32,3
Sharp NE-Q5E2E	165	4,77	4,46	34,6	43,1
Sharp NT-R5E2E	175	4,95	5,55	35,4	44,4

### *Energia grigia*

E' la quantità di energia necessaria al ciclo completo di fabbricazione di un modulo (estrazione materie prime, trasporto, lavorazione).

### *Tempo di recupero energetico*

E' il tempo necessario al modulo per produrre una quantità di energia uguale alla propria energia grigia.

### *Fattore di rimborso energetico*

E' il rapporto tra la durata di vita di un modulo e il suo tempo di recupero energetico (oppure tra E<sub>tot</sub> ed E<sub>grigia</sub>).

### CONFRONTI TRA DIVERSI MODULI

	unità	Si mono	Si multi	Si amorfo
Energia grigia	kWh/Wp	5-8	3,5-7	2,5-4
Tempo di recupero energetico	anni	3,9-6,6	2,9-5,8	2,1-3,3
Fattore di rimborso energetico	-	3,7-6,4	4,3-8,6	7,5-126

I ipotesi: produzione specifica annua = 1.200 [kWh/kWp]; durata di vita 25 anni; senza considerare il tipo di applicazione.

Nella sua vita, un modulo fotovoltaico produce da 4 a 10 volte più energia di quella che è stata necessaria per fabbricarlo.

Soltanto i sistemi energetici che utilizzano le fonti rinnovabili hanno un fattore di rimborso energetico superiore a 1.

---

---

## IL GENERATORE FOTOVOLTAICO

E' costituito da un insieme di moduli collegati in serie e parallelo tra di loro.

### *Collegando in serie i moduli:*

La corrente totale del modulo si "adeguа" a quella del modulo che genera meno corrente, mentre la tensione globale è data dalla somma della tensione dei singoli moduli.

Un insieme di moduli collegati in serie costituisce la cosiddetta "stringa".

### *Mettendo in parallelo più stringhe di moduli:*

La corrente totale del generatore fotovoltaico è data dalla somma della corrente in uscita da ogni stringa.

La tensione globale del sistema è invece equivalente alla tensione generata da una singola stringa.

La potenza nominale totale del sistema è pari alla somma della potenza nominale di ogni singolo modulo.

### *Effetti delle ombre*

La riduzione della potenza erogata causata da un ombreggiamento parziale del campo fotovoltaico può essere non proporzionale alla porzione di superficie in ombra, ma molto superiore.

Occorre prestare quindi molta attenzione ai collegamenti: se, ad esempio, di fronte al campo fotovoltaico si ha un palo, bisognerà fare in modo che l'effetto dell'ombra si senta su una sola stringa e non vada ad intercettare più serie di moduli, compromettendo quindi il corretto funzionamento di tutto l'impianto.

E' come se si stringesse con una mano una canna entro cui scorre dell'acqua, impedendo alla stessa di fluire. Analogamente avviene con le cariche generate dalle celle fotovoltaiche dei diversi moduli: se un'ombra appare su un modulo, gli elettroni provenienti dai moduli esposti al sole "trovano la strada bloccata" e non possono arrivare "a destinazione"....

---

---

## LE BATTERIE PER I SISTEMI FOTOVOLTAICI

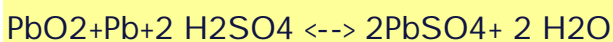
L'energia prodotta dai moduli fotovoltaici viene immagazzinata nelle batterie, per renderla disponibile quando non c'è sufficiente illuminazione solare.

E' l'elemento più critico di tutto il sistema, l'unico che esige manutenzione.

Requisiti principali:

- costante disponibilità ad assorbire ed erogare energia elettrica in grandi e piccole quantità;
- erogazione di corrente sufficientemente grande;
- lunga durata di vita nel funzionamento ciclico;
- esercizio con poca manutenzione;
- costi minimi.

Tra le batterie disponibili sul mercato, la più idonea risulta sempre la batteria al piombo, grazie soprattutto al rendimento di carica e scarica e al rapporto tra prezzo e prestazioni.



Durante la carica gli elettrodi emettono acido; durante la scarica si produce il processo inverso.

Batteria carica:

Piastra positiva --> perossido di piombo (PbO<sub>2</sub>)

Piastra negativa --> puro piombo (Pb)

Elettrolita --> acido solforico diluito

Batteria scarica:

Piastra positiva e negativa --> solfato di piombo (PbSO<sub>4</sub>)

La carica avviene immettendo energia elettrica. Una carica troppo veloce potrebbe danneggiare le piastre.

Le batterie adottate negli impianti fotovoltaici possono assorbire correnti di carica molto deboli, cosa che le normali batterie non potrebbero fare.

Batteria sovraccaricata --> in prossimità degli elettrodi si formano ossigeno ed idrogeno. La miscela dei due gas è detta gas tonante ed è esplosiva (pericolo !! --> sistemare le batterie in luoghi ben arieggiati). Il regolatore di carica (centralina) previene la sovraccarica della batteria, bloccando il processo di carica quando si raggiunge una tensione finale di carica di 2,35 V per cella. Per evitare invece l'eccesso di scarica, con relativo rischio di solfatazione delle piastre, il regolatore interromperà il prelievo di corrente nel caso in cui la tensione dell'elemento scende sotto un certo livello (1,75 V). Aumentando la corrente di scarica, inoltre, aumentano le perdite dovute alla resistenza ( $P = R \cdot I^2$ ) e si incrementano le reazioni secondarie, riducendo in tal modo la capacità della batteria.

Ecco che quindi la capacità di una batteria ( $C_n = I_n \cdot t_n$  [Ah],  $I_n$ =corrente di scarica nominale;  $t_n$ =tempo di scarica nominale) viene sempre definita in funzione del tempo di

scarica e della temperatura di funzionamento.

Ad esempio, C20 indica la capacità di una batteria che è scaricata in 20 ore alla temperatura di 25°C. Temperatura di esercizio ideale per gli accumulatori al piombo: 15 - 25°C.

Col ridursi della temperatura la capacità diminuisce, mentre con l'aumentare della temperatura si velocizzano le reazioni chimiche e si verifica una maggiore autoscarica -> 3 - 5% / mese a 20°C.

Poiché al variare della temperatura cambia la tensione ( $DV_{max}(T) = -6 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ) è importante che il regolatore sia in grado di considerare la temperatura.

### Tipi principali di batterie:

#### *Batterie con piastre positive e negative a griglia :*

Durata di vita doppia di quella delle automobili.

Debole autoscarica, resistenza ai cicli, poca manutenzione.

#### *Batterie OPzS con piastre positive corazzate :*

Piastre positive tubolari corazzate, piastre negative a griglia.

La lega al piombo contiene selenio e pochissimo antimonio, garantendo in tal modo una buona resistenza ai cicli.

Eccezionale resistenza ai cicli (circa 3000 cicli con una profondità di scarica del 30%), autoscarica inferiore al 3%, carica senza problemi, poca manutenzione, impiego possibile fino a -5°C al massimo, ottimo rapporto prezzo-qualità, grande durata di vita. Applicazioni: impianti con forte sollecitazione delle batterie, per grandi capacità.

#### *Batterie a blocchi con piastre positive tubolari:*

Le piastre positive tubolari e le piastre negative a griglia sono isolate le une dalle altre mediante separatori microporosi. Un ulteriore involucro in fibre di vetro racchiude l'elettrodo positivo e previene cortocircuiti interni. La speciale lega del blocco e la grande scorta di elettrolito assicurano assenza di manutenzione per 3 anni. Anche con correnti deboli la carica è buona (sono quindi ideali per gli impianti fotovoltaici), grande durata di vita, elevata resistenza ai cicli (circa 4.500 cicli con profondità di scarica del 30%), alto rendimento in Ah (95-98%).

#### *Batterie con elettroliti solidi:*

Utili per temperature sotto lo zero.

Sono robuste e non hanno problemi per trasporti in aereo.

Durata cicli: maggiore che nelle batterie con piastra a griglia, ma inferiore a quelle OPzS o tubolari.

Poiché la cella è molto sensibile alle perdite idriche il processo di carica deve essere

perfettamente adeguato alla batteria, in modo da contenere al massimo la formazione di gas.

Costo elevato.

### *Batterie al nichel-cadmio*

Per temperature estreme (da - 50°C ad oltre + 55°C).

Nel caso dei piccoli cicli il rendimento in Ah è di oltre il 95% e, con scariche profonde, ancora del 70%.

Le batterie al Ni-Cd possono essere scaricate completamente fino all'inversione di polarità. Con buone condizioni di funzionamento la durata di vita è lunghissima.

Essendo la scarica totale possibile, il regolatore di carica è superfluo. Svantaggio: alta autoscarica (5 - 10 volte superiore di quella delle batterie al piombo).

Alto costo.

Rendimento batterie =  $E_{out} / E_{in}$  [%]

Il rendimento sale quanto più è basso il rapporto tra  $I_{sc}$  e  $I_{car.}$ . Un buon rendimento 0,83.

Durata di vita: se la batterie è "ben regolata" può arrivare anche a 8 - 10 anni di vita.

Se la profondità di scarica è eccessiva, la durata di vita della batteria si riduce:

Profondità di scarica	N° cicli
80%	200
40%	600
30%	800
20%	1100

### Collegamenti serie - parallelo

Collegamento in serie: polo (+) di una batteria con il polo (-) di un'altra --> si sommano le tensioni e le capacità in Wh; le capacità in Ah non cambiano.

Collegamento in parallelo: tra poli uguali --> si sommano le capacità in Ah e in Wh, mentre la tensione rimane costante.

Si privilegia il collegamento in serie, tale da ottenere la tensione richiesta dal sistema. Si evita il collegamento in parallelo, perché la carica risulterebbe sempre disuniforme

e la durata di vita delle batterie ne sarebbe penalizzata.

### Manutenzione

Controllo periodico dell'elettrolita.

Gli intervalli di manutenzione possono essere prolungati facendo ricorso a dispositivi di ricombinazione dell'idrogeno (capsule al carbone attivo da avvitare al posto dei tappi): l'ossigeno e l'idrogeno che si producono durante la carica si congiungono di nuovo per formare acqua, che ritorna alla batteria riducendo sensibilmente le perdite idriche.

### Altri accorgimenti

Per ridurre al minimo l'escursione termica, isolare le batterie.

I collegamenti tra diverse batterie devono essere fatti unicamente tra elementi assolutamente identici.

### Attenzione!

- Alla sovraccarica perenne --> l'acqua si scompone in miscela tonante e corrode le piastre.
- Alla scarica profonda --> le griglie delle piastre si trasformano in solfato di piombo, con conseguenti perdite di capacità.
- Allo stoccaggio in stato di scarica --> le masse attive degli elettrodi formano cristalli di solfato di piombo grossi e duri che riducono la capacità.
- Alle basse temperature --> allo stato scarico l'elettrolita può congelare e distruggere il contenitore dell'accumulatore.

### Confronto tra batterie per impianti solari e batterie per autotrazione:

	Batteria per impianti solari	Batteria per autotrazione
Corrente di spunto	Piccola	Grande
Rendimento	Grande	Medio
N° cicli	Grande	Piccolo
Autoscarica	Piccola	Media
Durata di vita	Lunga	Media

## LE CENTRALINE ELETTRONICHE

Coordinano in modo ottimale il generatore solare e l'accumulatore e ottimizzano il flusso di energia.

Servono per il monitoraggio dell'impianto.

Gli strumenti indicatori sono importanti perché l'utenza impara ad adattare il prelievo di corrente all'offerta disponibile, in modo da prolungare sensibilmente l'autonomia del sistema.

Per valutare il funzionamento di un impianto fotovoltaico sono sufficienti un amperometro e un voltmetro all'entrata, un voltmetro per la tensione di batteria e un amperometro per la corrente di scarica.

Se la temperatura del locale batterie non è tra i 15 e i 25°C, è necessaria una compensazione della tensione finale di carica (corretta con un valore compreso tra -3 e -6 mV per ogni °C di aumento della temperatura).

## GLI INVERTER

Si nota un aumento delle installazioni di "inverter" anche negli impianti solari fotovoltaici per l'alimentazione di utenze isolate non collegate alla rete elettrica nazionale.

La motivazione principale è il desiderio di poter collegare i normali apparecchi elettrici funzionanti a 220V c.a. senza dover utilizzare esclusivamente quelli a bassa tensione a 12V c.c. .

### Inverter ad onda quadra:

- semplice tecnologia;
- rischio di generazione di armoniche dispari;
- nessuna regolazione della tensione in uscita (varia col carico e con la tensione di entrata).

### Inverter ad onda sinusoidale modificata:

- miglior rendimento;
- meno armoniche degli inverter ad "onda quadra";
- regolazione precisa della tensione;
- appropriati per l'alimentazione di molti apparecchi (TV, motori, lampade a basso consumo).

## Inverter ad onda sinusoidale:

- tecnica simile a quella degli inverter per connessione alla rete elettrica, ma con circuiti più semplici, senza protezioni e sincronizzazione rete;
- rendimenti elevati, adatti per praticamente tutti i tipi di utilizzatori.

## Elementi importanti per la scelta

- precisione della tensione in uscita (% rispetto a 230 Vc.a.);
- spunti di potenza --> molto importante per certi apparecchi utilizzatori (frigoriferi, pompe);
- distorsione armoniche rendimento--> è molto importante verificare il rendimento a potenze basse;
- consumo e precisione dello stand-by (sistema di spegnimento parziale automatico in assenza di carico).

## GLI APPARECCHI UTILIZZATORI

Prima di pensare all'impianto fotovoltaico occorre sempre definire con precisione il carico elettrico e valutare l'eventuale possibilità di ottimizzazione energetica, perché bisogna sempre ricordarsi che "l'energia meno cara è quella risparmiata".

### Lampade tubolari fluorescenti

Consumano da 3 a 5 volte meno delle lampade ad incandescenza di pari luminosità. Lunga durata di vita - buona convenienza economica.

La tensione di accensione è prodotta da un convertitore ad alta frequenza, che provoca l'illuminazione del gas. La lampada a 12 V c.c. si accende più rapidamente che nelle tradizionali applicazioni a 220 V / 50 Hz. A basse temperature (sotto i 0°C) l'accensione può essere difficoltosa. Questo tipo di lampade è comunque adatto ai locali di lavoro, ai corridoi e per l'illuminazione esterna.

### Lampade a risparmio energetico (PL/PLC/PLS/4p)

Efficienza --> da 5 a 6 volte migliore delle lampade ad incandescenza.

Durata di vita --> 8 volte quella di una lampada ad incandescenza.

Forma più contenuta.

Luce più calda --> adatta per locali abitati. Idonee per applicazioni a temperature sotto lo zero. Sopportano notevoli variazioni di temperatura.

### Lampade alogene

Sono uno sviluppo delle lampade ad incandescenza. Hanno una bassa efficienza energetica (classe E - F). Luce chiara e calda. Consigliate soltanto per l'illuminazione temporanea e temporizzata.

### Lampade ad incandescenza

Reperibili anche per basse tensioni (12 o 24 V).

Bassa efficienza.

Basso costo.

Usandole a bassa tensione hanno una scarsa durata di vita.

Utili per brevi utilizzi.

### Lampade al vapore di sodio

Alto rendimento.

Luce arancione, monocromatica.

Prezzo elevato.

Richiedono un circuito elettronico di accensione.

Riassumendo, ad esempio...

Tipo di Lampada	Potenza [W]	Flusso [lm]	Rendimento [lm/W]	Rendimento relativo rispetto lampada ad incandescenza da 60W
Incandescente	40	580	14,5	0,9
Incandescente	60	980	16,3	1
Alogena	50	1000	20	1,23
Alogena	100	2300	23	1,41
Fluorescente diritta	8	430	54	3,31
Fluorescente diritta	13	950	73	4,48
Fluorescente U (PL)	9	600	67	4,11
Fluorescente U (PL)	11	900	82	5,03
Sodio	18	1800	100	6,14
Sodio	36	4800	137	8,41

## Frigoriferi

E' importante un compressore a basso consumo e uno spesso rivestimento termoisolante. I frigoriferi a basso consumo hanno dei costi più elevati, ma consumano molta meno corrente elettrica. Devono essere installati in locali freschi. Attenti all'uso: ridurre il numero di aperture, mantenere il frigorifero il più possibile pieno. Privilegiare i modelli con l'apertura in alto rispetto a quelli ad armadio.

fonte: enerpoint, elaborazione: WUTEL-SEW