

# Energie Rinnovabili per le scuole

Il manuale del giovane ingegnere: principi di elettrotecnica e nozioni sulla progettazione di CER.



**Lezione 4** - Principio di funzionamento di un impianto di generazione e criteri di dimensionamento.

ANGELUCCI VALERIO

Vice responsabile del progetto di Ricerca di Sistema "l'Utente al centro della transizione energetica"



## **Lezione 4** - Principio di funzionamento di un impianto di generazione e criteri di dimensionamento.

Un impianto fotovoltaico è costituito da numerose piccole celle fotovoltaiche che convertono la radiazione solare [20] incidente in corrente continua, successivamente trasformata in alternata attraverso l'uso di un dispositivo chiamato inverter. Tale impianto permette di:

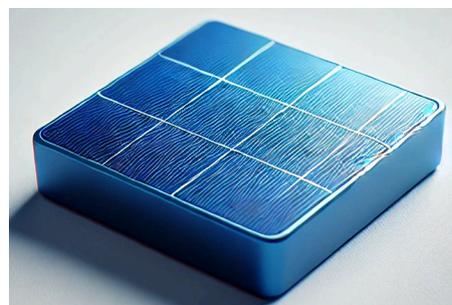
- **promuovere l'uso di energia rinnovabile:** la produzione di energia elettrica avviene direttamente nel punto di utilizzo e per tale motivo si riducono le perdite di energia dovute al trasporto della stessa da centrali elettriche distanti.
- **ridurre le emissioni inquinanti nell'ambiente:** la produzione di energia elettrica fotovoltaica non comporta emissioni di gas serra, particolati o inquinanti atmosferici.
- **ridurre l'uso di combustibili fossili:** risorse soggette a fluttuazioni di prezzo dovute a problemi di disponibilità e a questioni di natura geopolitica.

Gli impianti fotovoltaici hanno una vita utile che spesso supera i 20 anni e richiedono una manutenzione minima, che si limita generalmente alla pulizia dei pannelli e alla verifica delle connessioni elettriche. Sono soluzioni modulari che si adattano alle specifiche esigenze e possibilità economiche dell'utente finale. È possibile, infatti, installare inizialmente un sistema di piccole dimensioni ed espanderlo successivamente aggiungendo moduli per aumentarne la potenza.



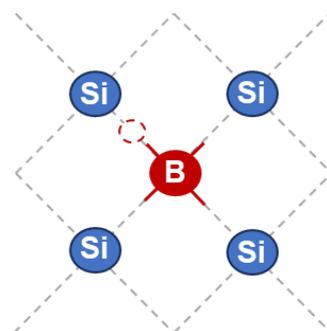
## Principio di funzionamento di un impianto fotovoltaico

Il componente principale di un impianto di produzione di energia a fonte solare è la cella fotovoltaica, costituita da una sottile fetta di materiale semiconduttore, tipicamente silicio, con uno spessore di circa

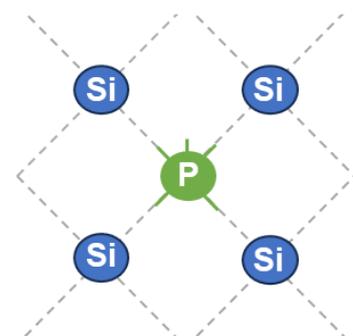


0.3 mm e una superficie variabile tra i 100 e i 225 cm<sup>2</sup>. La cella fotovoltaica genera corrente elettrica sfruttando l'effetto fotovoltaico, che si manifesta quando il silicio è "drogato", ossia arricchito intenzionalmente con impurità per modificarne le proprietà elettriche.

L'aggiunta di una piccola quantità di boro[21] (B), al silicio (Si) produce un semiconduttore di tipo P, caratterizzato da lacune dovute alla presenza di legami incompleti tra gli atomi di boro e di silicio. Queste lacune, originate dal deficit di elettroni, conferiscono alla struttura del reticolo cristallino una carica elettrica positiva.



L'aggiunta di fosforo (P)[22] al silicio genera un semiconduttore di tipo N. In questo caso, quattro degli elettroni dell'atomo di fosforo si legano con quattro elettroni del silicio, lasciando un quinto elettrone libero che contribuisce alla conduzione elettrica.



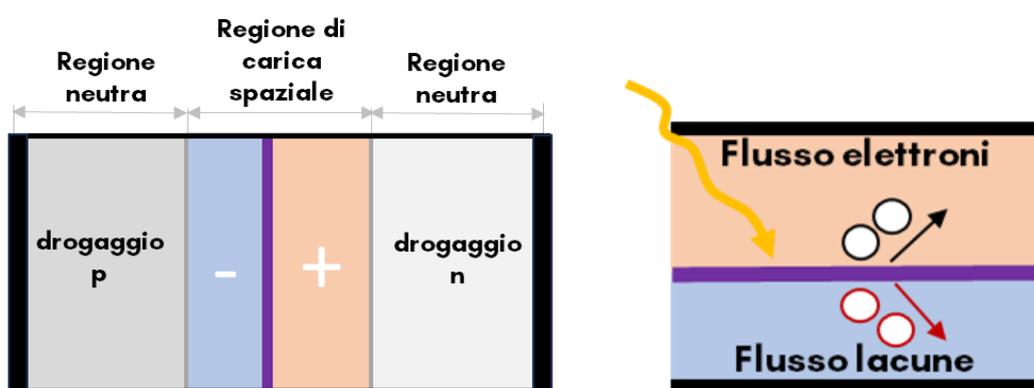
[20] La radiazione solare è la quantità totale di energia elettromagnetica solare che incide, in un dato intervallo temporale, su una superficie d'area unitaria, misurata in kWh/m<sup>2</sup>. Comprende una componente diretta dal sole, una radiazione diffusa dal cielo e una radiazione riflessa dalle superfici circostanti.

**i** [21] Elemento appartenente al gruppo III della tavola periodica.

[22] Elemento appartenente al gruppo V della tavola periodica.



La combinazione di uno strato P con uno strato N crea una giunzione p-n, una regione di carica spaziale che facilita la diffusione e l'accumulo di elettroni nella regione P e di lacune nella regione N. Questo movimento di cariche crea una zona di "svuotamento", in cui le cariche mobili si neutralizzano per ricombinazione, lasciando solo le cariche fisse degli ioni dopanti: ioni positivi nella regione N e ioni negativi nella regione P; la separazione delle cariche genera un campo elettrico che agisce da barriera al movimento ulteriore di cariche. Quando un fotone colpisce il materiale semiconduttore, eccita gli elettroni, creando coppie elettrone-lacuna sia nella zona N che nella zona P. Il campo elettrico presente nella zona di svuotamento separa queste cariche, spingendo gli elettroni verso la regione N e le lacune verso la regione P. Il movimento degli elettroni, supportato dal campo elettrico nella zona di svuotamento, determina il passaggio di corrente elettrica fintanto che la cella è esposta alla luce e connessa a un circuito elettrico. Per massimizzare la produzione di corrente elettrica, è essenziale quindi che la superficie esposta al sole sia massima.

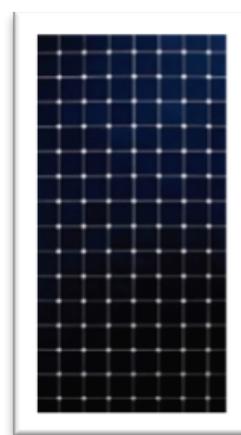




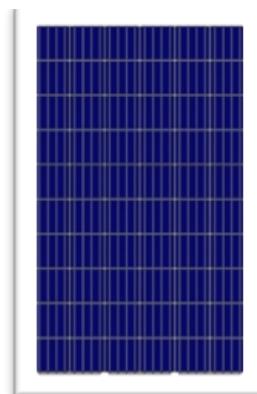
## Dalla cella al modulo fotovoltaico

Dal punto di vista costruttivo, i moduli fotovoltaici sono tipicamente assemblati con 36 celle disposte in serie e parallelo su quattro file e hanno una superficie compresa tra 0.5 e 1 m<sup>2</sup>. Un modulo standard include una lamina di protezione superiore in vetro temperato, un materiale di incapsulamento come l'EVA (Etilene Vinil Acetato) per isolare elettricamente le celle, un substrato di supporto e una cornice in alluminio.

Il moduli più diffusi in commercio sono in silicio cristallino, disponibile sia nella variante mono che poli cristallina. Le celle monocristalline, fatte di silicio di alta purezza, sono note per la loro elevata efficienza, variabile tra il 16,5% e il 21,5%. Questi moduli si distinguono per la loro lunga durata e capacità di mantenere circa il 92% del rendimento iniziale dopo 20 anni. Presentano una colorazione blu scuro dovuta al rivestimento antiriflettente di ossido di titanio che ottimizza l'assorbimento della luce solare.



I moduli policristallini, sono formati da cristalli di silicio che si aggregano in modi e orientamenti diversi, producendo caratteristiche iridescenze. Sebbene meno performanti dei monocristallini, con un'efficienza che varia dal 15,1% al 18,2%, i policristallini offrono un costo inferiore e una buona durata, mantenendo l'85% del rendimento iniziale dopo 20 anni.





Oltre al silicio cristallino esistono i moduli a film sottile, realizzati con diversi materiali, tra cui il tellurio di cadmio (CdTe) e il seleniuro di rame indio gallio (CIGS), che offrono buone prestazioni anche con bassa illuminazione e sono particolarmente resistenti a temperature estreme. Tuttavia, i moduli in silicio amorfo hanno una bassa efficienza, circa il 14%, e una maggiore fragilità, fattori che ne limitano l'uso nonostante il basso costo dei materiali.



Importanti per la protezione del modulo sono i diodi di bypass, che impediscono la formazione di punti caldi e proteggono dalle correnti inverse, particolarmente utili in caso di ombreggiamento parziale delle superfici. Recentemente, l'introduzione degli ottimizzatori di potenza ha migliorato ulteriormente la resa dei pannelli fotovoltaici, permettendo a ciascun modulo di operare ottimizzando indipendentemente la propria tensione e corrente per massimizzare la produzione energetica. Di seguito una sintesi dei vantaggi e svantaggi per le differenti tipologie di moduli esaminati.

|                                 | Rendimento                                    | Vantaggi                                                                                                                       | Svantaggi                                                                                                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GaAs Arseniuro di Gallio        | 32.5 %<br>(massima per applicazioni spaziali) | elevata resistenza alle alte temperature e uno dei più alti coefficienti di assorbimento di luce tra i materiali fotovoltaici. | tossicità dell'arsenico e disponibilità (anche se quella del gallio è meno problematica rispetto a materiali come l'indio). |
| Tellurio di Cadmio              | 12,4 ÷ 13,4%                                  | basso costo di produzione e la relativa semplicità del processo di produzione delle celle.                                     | tossicità del cadmio e carenza di tellurio a lungo termine.                                                                 |
| CIS Diseleniuro di Indio e Rame | 13,6 ÷ 14,6%                                  | buona efficienza energetica anche in condizioni di luce non ottimali.                                                          | materiale tossico e carenza di indio a lungo termine.                                                                       |



|                         | Rendimento    | Vantaggi                                                                                                     | Svantaggi                                                                          |
|-------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Silicio monocristallino | 16,5 ÷ 21,5 % | Alto rendimento, tecnologia matura                                                                           | elevata quantità di energia necessaria al processo di fabbricazione                |
| Silicio policristallino | 15,1 ÷ 18,2 % | Basso costo, fabbricazione semplice                                                                          | sensibile alle impurità (maggiori accortezze durante il processo di fabbricazione) |
| Silicio amorfo          | 8 ÷ 14 %      | basso costo, comportamento stabile al variare della temperatura, resa energetica alta con radiazione diffusa | dimensioni elevate (rendimento basso),                                             |

### Dal modulo all'impianto fotovoltaico

Più moduli collegati meccanicamente ed elettricamente formano un pannello, ossia una struttura che può essere ancorata al suolo o ad un edificio. Più pannelli collegati elettricamente in serie costituiscono una stringa e l'insieme di stringhe, collegate in parallelo, realizza un impianto fotovoltaico.

Per convertire la corrente continua dei moduli in corrente alternata, compatibile con la rete elettrica nazionale è necessario un inverter. Questo dispositivo utilizza la modulazione di larghezza di impulso (PWM), una tecnica che consiste nell'accendere e spegnere rapidamente interruttori statici, per ottenere una corrente alternata, la cui forma d'onda è regolata agendo sulla durata degli impulsi. Gli inverter dispongono inoltre della tecnologia MPPT (Maximum Power Point Tracking), che ottimizza la produzione energetica regolando la tensione e la corrente dell'impianto per massimizzare la potenza in qualsiasi condizione meteorologica.





Gli impianti fotovoltaici si classificano in due tipologie principali:

**1. Isolati (Stand-alone):** questi sistemi non sono connessi alla rete elettrica pubblica e si affidano a moduli fotovoltaici combinati con sistemi di accumulo per fornire energia anche in assenza di luce solare diretta. Sono particolarmente vantaggiosi in aree remote o difficilmente raggiungibili, sostituendo o affiancando i gruppi elettrogeni. Questi impianti sono spesso dimensionati per coprire il fabbisogno diurno di energia e per accumulare l'eccesso prodotto per l'utilizzo serale. Applicazioni tipiche includono:

- ripetitori radio e stazioni di rilevamento;
- sistemi di illuminazione stradale e segnaletica;
- applicazioni in camper, rifugi di montagna e strutture pubblicitarie;

**2. Connessi alla rete (Grid-connected):** Questi sistemi sono integrati con la rete elettrica esistente. Durante le ore in cui la produzione fotovoltaica non soddisfa il fabbisogno elettrico, il sistema attinge energia dalla rete pubblica mentre, in caso contrario, l'eccesso di produzione è immesso nella stessa rete. Questi impianti possono anche non richiedere batterie di accumulo, dato che l'energia in eccesso può essere venduta sul mercato elettrico.



Stand-alone



Grid-connected



## Fattori che influenzano la produzione annua di un impianto fotovoltaico

La quantità di energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico nell'arco di un anno dipende principalmente da tre fattori:

**1. disponibilità della radiazione solare:** si rende necessario valutare questa grandezza perché la produzione fotovoltaica dipende dall'irraggiamento, che varia nel tempo e luogo di riferimento. In Italia, i dati sulla radiazione solare media possono essere ottenuti da:

- **norme tecniche** come quelle dei comitati CEI e UNI;
- **atlanti solari**, come quello sviluppato da RSE (<https://sunrise.rse-web.it/>);
- **banche dati**;
- **Software** come il sistema informativo geografico fotovoltaico PVGIS fornito dalla Commissione Europea.

**2. Orientamento e Inclinazione dei Moduli:** la Terra ruota intorno al sole con un'inclinazione rispetto al proprio asse di circa 23.45 gradi. Questa caratteristica influisce sull'angolo di incidenza che i raggi solari formano con i pannelli fotovoltaici. Tale aspetto va considerato in fase di progettazione e installazione perché l'efficienza di produzione di un impianto fotovoltaico è ottima quando i raggi solari incidono perpendicolarmente ai pannelli. Per avere la massima producibilità occorre agire su queste grandezze:

- **Azimut:** indica la direzione ottimale verso cui orientare i pannelli. Nell'emisfero boreale, come in Italia, l'orientamento ideale è verso sud per massimizzare l'esposizione solare. In luoghi del mondo dove le estati sono molto calde, un orientamento est o ovest può prevenire il surriscaldamento pomeridiano.



- **Tilt:** rappresenta l'angolo di inclinazione dei pannelli rispetto al suolo. Un buon punto di partenza è impostare l'inclinazione allo stesso valore della latitudine del sito di installazione. Per ottimizzare la produzione estiva, l'angolo può essere ridotto di circa  $15^\circ$ , mentre in inverno, aumentato di circa  $15^\circ$  per captare meglio il sole più basso all'orizzonte.

**3.Prevenzione ombreggiamento:** la massima producibilità di un impianto è ottenuta in assenza di ombreggiamenti dovuti a edifici o alberi circostanti, che devono essere valutati prima dell'installazione dei pannelli fotovoltaici.

### **Metodi di installazione e configurazioni**

I moderni moduli fotovoltaici si prestano bene a essere utilizzati in differenti contesti architettonici. In funzione del loro grado di integrazione, si distinguono tre macrocategorie di impianti fotovoltaici:

**1.impianti non integrati:** includono moduli installati al suolo o su elementi di arredo urbano. Possono anche essere collocati sulle superfici esterne degli edifici o di altre strutture edilizie, in modalità che non corrispondono alle tipologie di integrazione parziale o totale.

**2.Impianti parzialmente integrati:** i moduli sono installati su elementi di arredo urbano, superfici esterne degli edifici o altre strutture, senza sostituire il materiale da costruzione originario (sono complanari al tetto o alla facciata).

**3.Impianti con integrazione architettonica completa:** questi impianti sostituiscono in tutto o in parte gli elementi architettonici degli edifici, come coperture, superfici verticali opache, superfici trasparenti o semitrasparenti e superfici apribili come: porte, finestre, vetrine, anche non apribili.



Gli impianti di questa tipologia, oltre ad assolvere la funzione di produzione dell'energia, devono presentare caratteristiche meccaniche e termiche che gli permettono di replicare la funzione degli elementi architettonici che sostituiscono.













