

**Dossier**

# **Solare Fotovoltaico**

**Progetto  
RES & RUE Dissemination**

Realizzato da  
ACCOMANDITA

A cura di:

Ing. Marco Prospero  
Ing. Claudio Minelli

## • **INDICE**

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. LA RADIAZIONE SOLARE .....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2. EFFETTO FOTOVOLTAICO .....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>3. TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA .....</b>   | <b>10</b> |
| 3.1. La cella Fotovoltaica .....  | 10        |
| 3.2. Il modulo fotovoltaico .....   | 10        |
| 3.3. Il generatore fotovoltaico .....   | 12        |
| <b>4. IMPIANTI FOTOVOLTAICI.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>5. IMPIANTI FOTOVOLTAICI "GRID CONNECTED" .....</b>                              | <b>15</b> |
| <b>6. IMPIANTI FOTOVOLTAICI "STAND ALONE" .....</b>                                 | <b>17</b> |
| <b>7. CRITERI DI DIMENSIONAMENTO<br/>DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO.....</b>           | <b>19</b> |
| 7.1. Verifica idoneità del Sito .....   | 19        |
| 7.2. Quantificazione del fabbisogno giornaliero di energia.....                     | 19        |
| 7.3. Scelta dell'inclinazione dei moduli .....                                      | 19        |
| 7.4. Calcolo della potenza di picco del generatore fotovoltaico .....               | 19        |
| 7.5. Valutazione delle perdite di impianto .....                                    | 20        |
| 7.6. Calcolo della potenza dell'inverter .....                                      | 20        |
| 7.7. Dimensionamento del sistema di accumulo<br>(solo per impianti "in isola")..... | 21        |
| <b>8. COSTI DI UN IMPIANTO FOTOVOLTAICO .....</b>                                   | <b>22</b> |
| <b>9. IMPATTO AMBIENTALE .....</b>  | <b>24</b> |
| <b>10. INDIRIZZI UTILI .....</b>  | <b>27</b> |

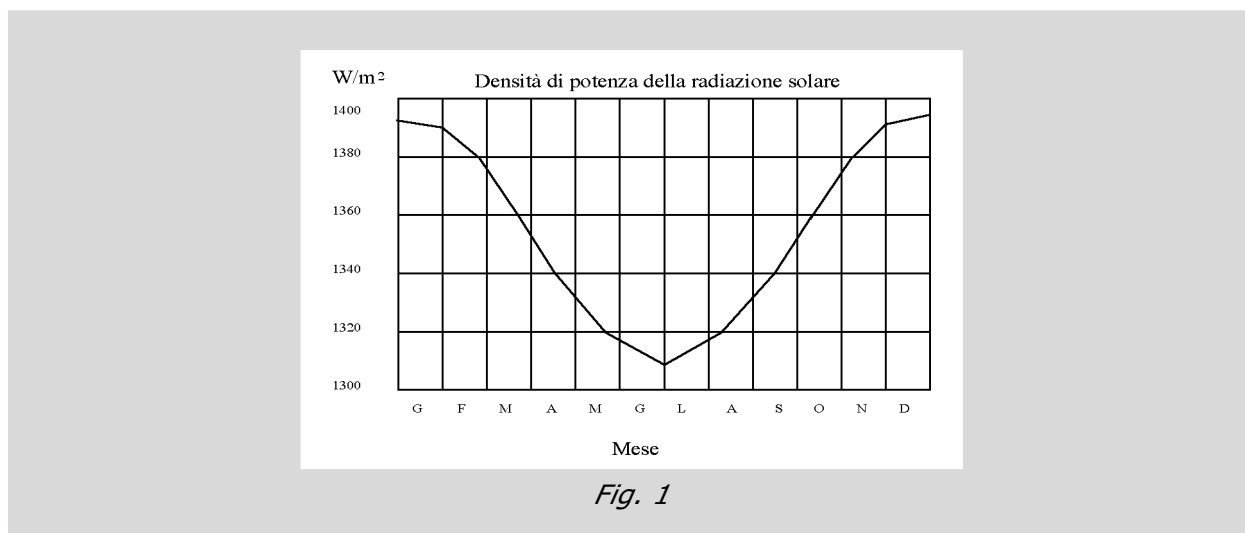
# 1. La radiazione solare

La radiazione solare è l'energia elettromagnetica emessa dai processi di fusione dell'idrogeno (in atomi di elio) contenuto nel sole.

L'energia solare che in un anno, attraverso l'atmosfera, giunge sulla terra è solo circa 1/3 dell'energia totale intercettata dalla terra al di fuori dell'atmosfera e di essa il 70% cade sui mari. Tuttavia la rimanente energia ( $1,5 \times 10^{17}$  kWh) che in un anno cade sulle terre emerse è pari ad alcune migliaia di volte il consumo totale energetico mondiale attuale.

L'irraggiamento (flusso solare o densità di potenza della radiazione solare) raccolto **fuori dall'atmosfera** su una superficie perpendicolare ai raggi solari è detta costante solare ed è pari a  $1353 \text{ W/m}^2$ , variabile durante l'anno del  $\pm 3\%$  a causa dell'ellitticità dell'orbita terrestre.

Nella figura seguente si riporta l'andamento dell'irraggiamento, rilevato al di fuori dell'atmosfera, durante un anno:



Il valore massimo misurato sulla superficie terrestre invece è di circa  $1000 \text{ W/m}^2$ , in condizioni ottimali di sole a mezzogiorno e giornata estiva serena.

La radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre si distingue in **diretta** e **diffusa**. Mentre la radiazione diretta colpisce una qualsiasi superficie con un unico e ben preciso angolo di incidenza, quella diffusa incide su tale superficie con vari angoli.

Occorre ricordare che quando la radiazione diretta non può colpire una superficie a causa della presenza di un ostacolo, l'area ombreggiata non si trova completamente oscurata grazie al contributo della radiazione diffusa. Questa osservazione ha rilevanza tecnica specie per i dispositivi fotovoltaici che possono operare anche in presenza di sola radiazione diffusa.

Una superficie inclinata può ricevere, inoltre, la radiazione riflessa dal terreno o da specchi d'acqua o da altre superfici orizzontali, tale contributo è chiamato **albedo**.

Le proporzioni di radiazione diretta, diffusa ed albedo ricevuta da una superficie dipendono:

- **dalle condizioni meteorologiche** (infatti in una giornata nuvolosa la radiazione è pressoché totalmente diffusa; in una giornata serena con clima secco predomina invece la componente diretta, che può arrivare fino al 90% della radiazione totale);
- **dall'inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale** (una superficie orizzontale riceve la massima radiazione diffusa e la minima riflessa, se non ci sono intorno oggetti a quota superiore a quella della superficie);
- **dalla presenza di superfici riflettenti** (il contributo maggiore alla riflessione è dato dalle superfici chiare; così la radiazione riflessa aumenta in inverno per effetto della neve e diminuisce in estate per l'effetto di assorbimento dell'erba o del terreno).

Al variare della località, inoltre, varia il rapporto fra la radiazione diffusa e quella totale e poiché all'aumentare dell'inclinazione della superficie di captazione diminuisce la componente diffusa e aumenta la componente riflessa, l'inclinazione che consente di massimizzare l'energia raccolta può essere differente da località a località.

La posizione ottimale, in pratica, si ha quando la superficie è orientata a sud con angolo di inclinazione pari alla latitudine del sito: l'orientamento a sud infatti massimizza la radiazione solare captata ricevuta nella giornata e l'inclinazione pari alla latitudine rende minime, durante l'anno, le variazioni di energia solare captate dovute alla oscillazione di  $\pm 23.5^\circ$  della direzione dei raggi solari rispetto alla perpendicolare alla superficie di raccolta.

Se chiamiamo  $I_D$  la radiazione diretta,  $I_S$  quella diffusa ed  $R$  l'albedo, allora si ha che la radiazione solare totale che incide su una superficie è:

$$I_T = I_D + I_S + R$$

## 2. Effetto Fotovoltaico

La conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica utilizza il fenomeno fisico dell'interazione della radiazione luminosa con gli elettroni nei materiali semiconduttori, denominato **effetto fotovoltaico**.

L'oggetto fisico in cui tale fenomeno avviene è la cella solare, la quale altro non è che un diodo con la caratteristica essenziale di avere una superficie molto estesa (alcune decine di cm<sup>2</sup>).

Per analizzare in modo più approfondito l'effetto fotovoltaico è necessario quindi descrivere, almeno concettualmente, il funzionamento del diodo (**giunzione p-n**). Inoltre visto che fino ad oggi il materiale più usato per la realizzazione delle celle solari è il silicio cristallino, si prenderà in considerazione il **diodo al silicio**.

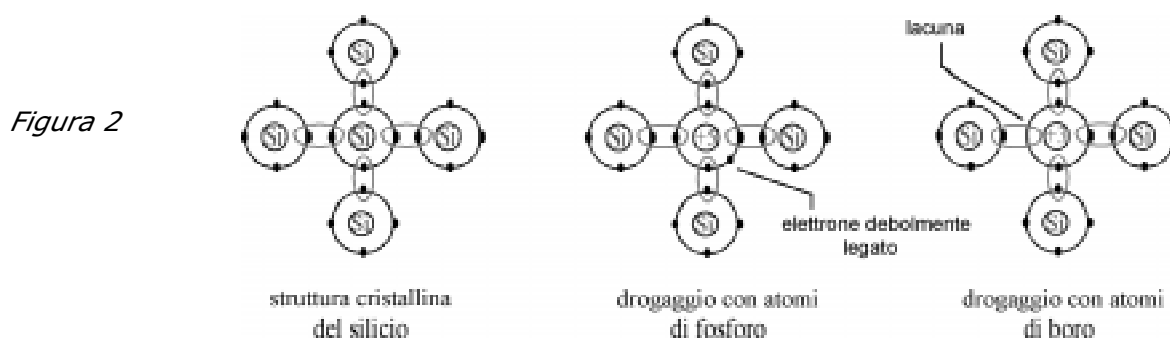
Il silicio ha 14 elettroni di cui 4 sono di valenza, cioè disponibili a legarsi in coppia con elettroni di valenza di altri atomi.

In un cristallo di silicio chimicamente puro ogni atomo è legato in modo covalente con altri 4 atomi cosicché all'interno del cristallo non vi sono, in conseguenza del legame chimico, elettroni liberi.

Se però alcuni atomi di silicio del cristallo vengono sostituiti con atomi di fosforo che ha 5 elettroni di valenza, di questi elettroni 4 verranno usati per legami chimici con atomi adiacenti di silicio, mentre il quinto può essere separato dall'atomo di fosforo mediante energia termica e diventa libero di muoversi nel reticolo del cristallo.

Analogamente se la sostituzione avviene con atomi di boro, che ha solo 3 elettroni di valenza, ci sarà un elettrone mancante per completare i legami chimici con gli atomi adiacenti di silicio. Tale elettrone mancante agisce come se fosse un elettrone 'positivo' e viene chiamato **lacuna**.

La figura 2 seguente, mostra graficamente la situazione descritta, in particolare nella prima si mostra la struttura del reticolo cristallino del silicio, nella seconda la variazione della struttura quando si effettua un drogaggio con atomi di fosforo ed infine nell'ultima situazione, viene mostrato il reticolo cristallino nel caso di drogaggio con atomi di boro.



Nel drogaggio con fosforo quindi i portatori di carica liberi sono negativi ed il materiale è chiamato di **tipo n**, mentre nella sostituzione di atomi di silicio con atomi di boro i portatori di carica sono positivi ed il materiale è chiamato di **tipo p**.

La **giunzione p-n (diodo)** si realizza unendo una barretta di materiale di **tipo n** con una barretta di materiale di **tipo p**.

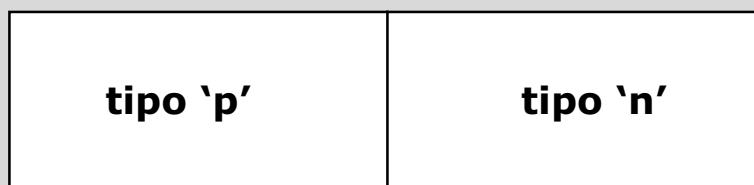


Figura 3

Gli elettroni liberi nel materiale **'n'** vedranno alla sinistra una regione nella quale non esistono elettroni liberi e quindi ci sarà un flusso di tali portatori verso la sinistra nel tentativo di ristabilire l'equilibrio. Analogamente le lacune vedranno alla loro destra una regione nella quale non ci sono lacune e ci sarà quindi un flusso di cariche positive verso destra. Con il proseguire di tale processo di diffusione, sul lato sinistro si verificherà un eccesso di cariche negative mentre un eccesso di cariche positive si avrà sul lato destro.

Quindi, nella regione di interfaccia dei due materiali si è creato un campo elettrico che diventa sempre più grande man mano che le lacune e gli elettroni continuano a diffondere verso i lati opposti. Il processo continua finché il potenziale elettrico diventa di una grandezza tale da impedire l'ulteriore diffusione di elettroni e lacune.

Quando si raggiunge tale equilibrio si sarà creato un campo elettrico permanente in un materiale senza l'aiuto di campi elettrici esterni.

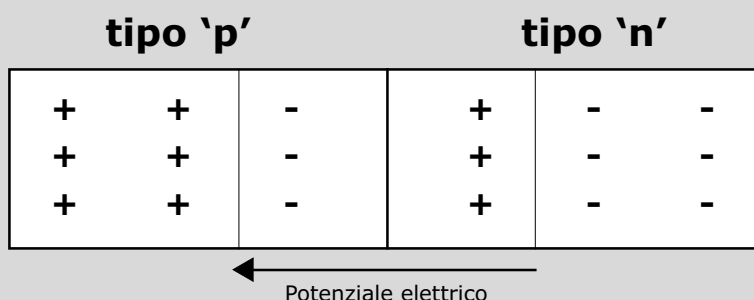


Figura 4

A questo punto è possibile spiegare l'**effetto fotovoltaico**. Infatti si supponga che un fotone (particella costituente un raggio solare) entri nella regione di **tipo p** del materiale. Se il fotone ha un'energia maggiore della **'band gap'**, cioè dell'energia minima richiesta per rompere un legame del reticolo del silicio, esso sarà assorbito e creerà una coppia elettrone-lacuna. L'elettrone così liberato si muoverà verso destra a causa del potenziale elettrico.

Se invece un fotone entra nella zona **n**, la lacuna creatasi si muoverà verso sinistra.

Tale flusso produrrà un accumulo di cariche positive sulla sinistra e di cariche negative sulla destra dando così origine ad un campo elettrico opposto a quello creato dal meccanismo di diffusione.

Quanti più fotoni arrivano alla giunzione, tanto più i campi tendono a cancellarsi l'uno con l'altro, fino ad arrivare al punto che non ci sarà più un campo interno che separerà ogni ulteriore coppia elettrone-lacuna.

E' questa la condizione che determina la tensione a circuito aperto della **cella fotovoltaica**.

Ponendo degli **elettrodi** (contatti metallici) sulla superficie della cella si può infine utilizzare il potenziale che è stato creato.

Tale flusso produrrà un accumulo di cariche positive sulla sinistra e di cariche negative sulla destra dando così origine ad un **campo elettrico** opposto a quello creato dal meccanismo di diffusione.

Quanti più fotoni arrivano alla giunzione, tanto più i campi tendono a cancellarsi l'uno con l'altro, fino ad arrivare al punto che non ci sarà più un campo interno che separerà ogni ulteriore coppia elettrone-lacuna.

## 3. Tecnologia Fotovoltaica

### 3.1. La cella Fotovoltaica

La conversione della radiazione solare in una corrente elettrica avviene nella **cella fotovoltaica**.

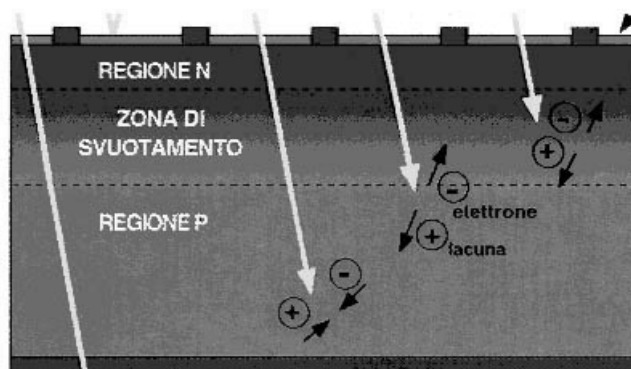


Figura 5 - Sezione di una cella fotovoltaica

Questo è un dispositivo costituito da una sottile fetta di un materiale semi-conduttore, molto spesso il silicio.

Generalmente una cella fotovoltaica ha uno spessore che varia fra i 0,25 ai 0,35mm ed ha una forma generalmente quadrata con una superficie pari a circa 100 cm<sup>2</sup>.

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

Altri materiali per la realizzazione delle celle solari sono:

- **Silicio Mono-cristallino:** Resa energetica fino 15 II 17 %
- **Silicio Poli-cristallino:** Resa energetica fino 12 II 14 %
- **Silicio Amorfo:** Resa energetica meno del 10 %
- **Altri materiali:** Arseniuro di gallio, diseleniuro di indio e rame, telliuro di cadmio

Attualmente il materiale più utilizzato è il **silicio mono-cristallino** che presenta prestazioni e durata nel tempo superiori a qualunque altro materiale usato per lo stesso scopo.

### 3.2. Il modulo fotovoltaico

Le celle solari costituiscono un prodotto intermedio dell'industria fotovoltaica: forniscono valori di tensione e corrente limitati in rapporto a quelli normalmente richiesti dagli apparecchi utilizzatori, sono estremamente fragili, elettricamente non isolate e prive di un supporto meccanico.



Esse vengono quindi assemblate in modo opportuno a costituire un'unica struttura: **il modulo fotovoltaico**.

Il modulo fotovoltaico è una struttura robusta e maneggevole su cui vengono collocate le celle fotovoltaiche.

I moduli possono avere dimensioni diverse (i più diffusi hanno superfici che vanno dai 0,5 m<sup>2</sup> ai 1,3 m<sup>2</sup>) e prevedono tipicamente 36 celle collegate elettricamente in serie.

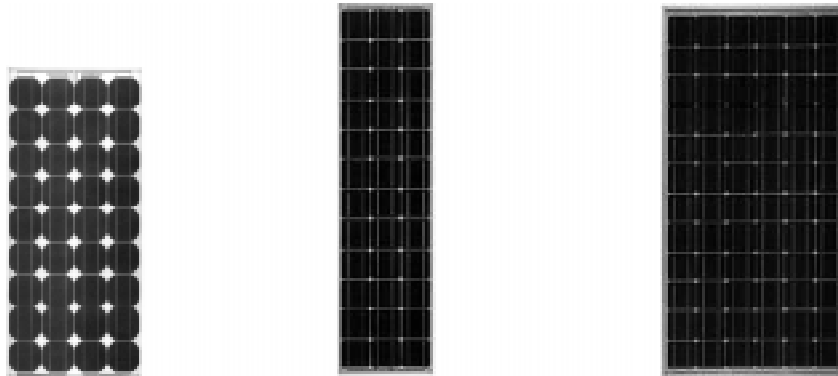


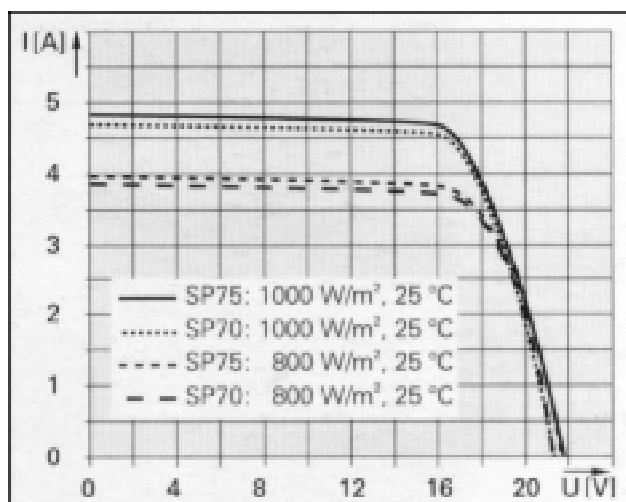
Figura 6 - Alcuni moduli fotovoltaici presenti sul mercato

Il modulo così costituito ha una potenza che varia fra i 50Wp ai 150Wp (\*) a seconda del tipo e dell'efficienza delle celle che lo compongono.

Le caratteristiche elettriche principali di un modulo fotovoltaico si possono riassumere nelle seguenti:

- **Potenza di Picco (Wp):** Potenza erogata dal modulo alle condizioni standard **STC** (Irraggiamento = 1000 W/m<sup>2</sup>; Temperatura = 25 °C; A.M. = 1,5)
- **Corrente nominale (A):** Corrente erogata dal modulo nel punto di lavoro
- **Tensione nominale (V):** Tensione di lavoro del modulo

Figura 7 - Grafico I-V  
(corrente tensione)  
di un modulo fotovoltaico

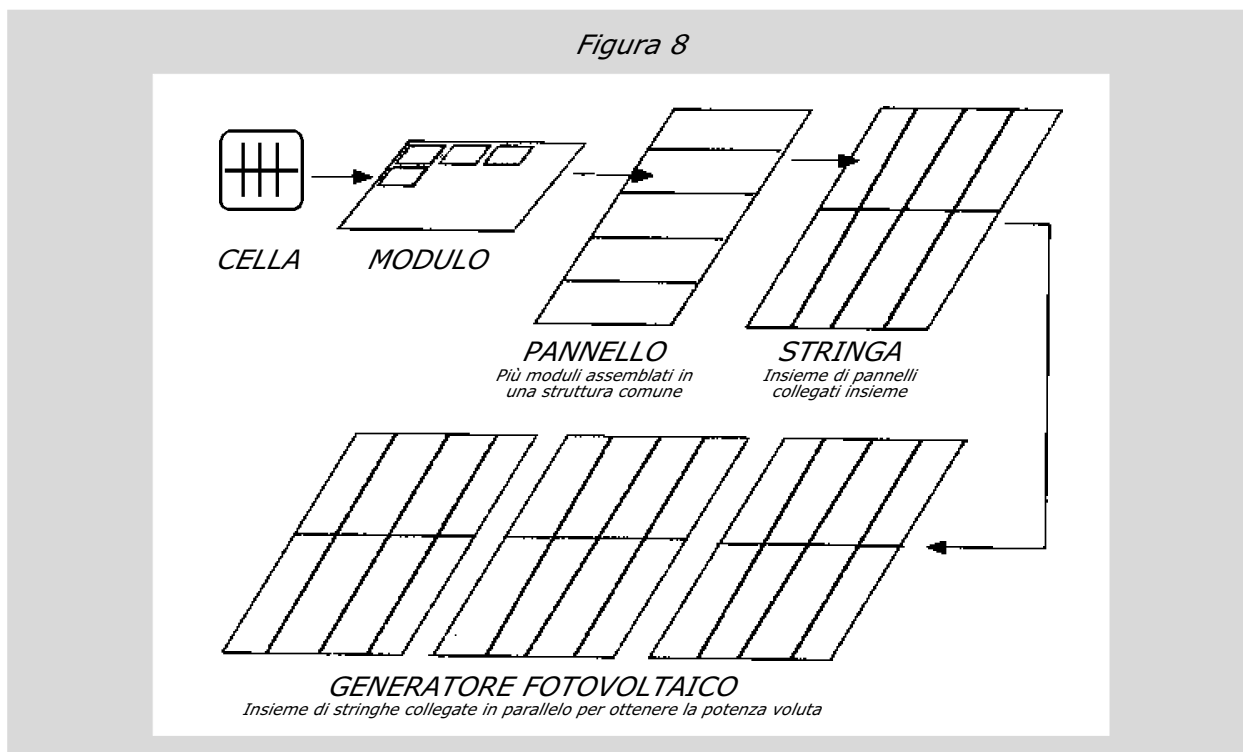


(\*) Il Wp (Watt picco) è l'unità di misura di riferimento di un modulo fotovoltaico ed esprime la potenza elettrica erogabile dal modulo in condizioni standard di riferimento (in tali condizioni si considera un Irraggiamento = 1000 W/m<sup>2</sup>).

### 3.3. Il generatore fotovoltaico

E' costituito dall'insieme dei moduli fotovoltaici opportunamente collegati in serie ed in parallelo in modo da realizzare le condizioni operative desiderate. In particolare l'elemento base del campo è il modulo fotovoltaico.

Più moduli assemblati meccanicamente tra loro formano il **pannello**, mentre moduli o pannelli collegati elettricamente in serie, per ottenere la tensione nominale di generazione, formano la **stringa**. Infine il collegamento elettrico in parallelo di più stringhe costituisce il **campo**.



I moduli fotovoltaici che realizzano il **generatore**, sono montati su una struttura meccanica in grado di sostenerli ed orientata in modo da massimizzare l'irraggiamento solare.

La quantità di energia prodotta da un generatore fotovoltaico varia nel corso dell'anno, in funzione del soleggiamento della località e della latitudine della stessa.

Per ciascuna applicazione il generatore dovrà essere dimensionato sulla base del:

- carico elettrico,
- potenza di picco,
- possibilità di collegamento alla rete elettrica o meno,
- latitudine del sito ed irraggiamento medio annuo dello stesso,
- specifiche architettoniche dell'edificio,
- specifiche elettriche del carico utilizzatore.

A titolo indicativo si considera che alle latitudini dell'Italia centrale, un m<sup>2</sup> di moduli fotovoltaici di buona qualità possa produrre in media:

**0,35 kWh/giorno nel periodo invernale**  
**0,65 kWh/giorno nel periodo estivo** |  $\Rightarrow$   $\approx$  **180 kWh/anno**

## 4. Impianti fotovoltaici

---

Si definisce **impianto o sistema fotovoltaico** un insieme di componenti meccanici, elettrici ed elettronici che concorrono a captare e trasformare l'energia solare disponibile, rendendola utilizzabile sotto forma di energia elettrica.

Tali sistemi, indipendentemente dal loro utilizzo e dalla taglia di potenza, possono essere divisi in due categorie:

- **isolati (*stand alone*)**
- **connessi in rete (*grid connected*)**

I sistemi isolati proprio per il fatto di non essere collegati alla rete elettrica, sono in genere dotati di sistemi di accumulo dell'energia prodotta. L'accumulo è reso necessario dal fatto che il campo fotovoltaico può fornire energia solo nelle ore diurne, mentre spesso la richiesta maggiore da parte dell'utenza è concentrata nelle ore pomeridiane e notturne. Durante la fase di insolazione è pertanto necessario prevedere un accumulo dell'energia non immediatamente utilizzata, che viene fornita al carico quando quella disponibile è ridotta o addirittura nulla.

Una configurazione di questo tipo comporta che il campo fotovoltaico venga dimensionato in modo tale da permettere, durante le ore di insolazione, sia l'alimentazione del carico che la ricarica delle batterie di accumulo.

Il sistema connesso in rete, invece, in genere non è provvisto di sistemi di accumulo in quanto l'energia prodotta durante le ore di insolazione viene immessa nella rete elettrica; viceversa durante le ore di insolazione scarsa o nulla il carico viene alimentato dalla rete. Un sistema di questo tipo, dal punto di vista della continuità di servizio, risulta più affidabile di uno **stand alone** che in caso di guasto non ha possibilità di alimentazione alternativa.

Sistemi ad elevata affidabilità, in questo caso, si possono ottenere integrando il sistema isolato con una fonte tradizionale, ad esempio, diesel (sistema ibrido diesel-elettrico).

Il compito di impianti **grid connected** è quindi quello di immettere in rete la maggior quantità possibile di energia.

La struttura fisica di un sistema fotovoltaico (isolato o connesso in rete) può essere molto varia, in generale però si possono distinguere tre blocchi fondamentali:

- **il campo fotovoltaico**
- **sistema di condizionamento della potenza**
- **un sistema di acquisizione dati**

Si noti che nel caso particolare di impianti senza accumulo connessi in rete, è la rete stessa che funge da accumulatore di capacità infinita. Il **carico** è rappresentato invece dall'utenza collegata alla rete, così come accade per un qualsiasi impianto grid connected.

## 5. Impianti fotovoltaici “Grid Connected”

I principali componenti che costituiscono un impianto fotovoltaico connesso in rete sono:

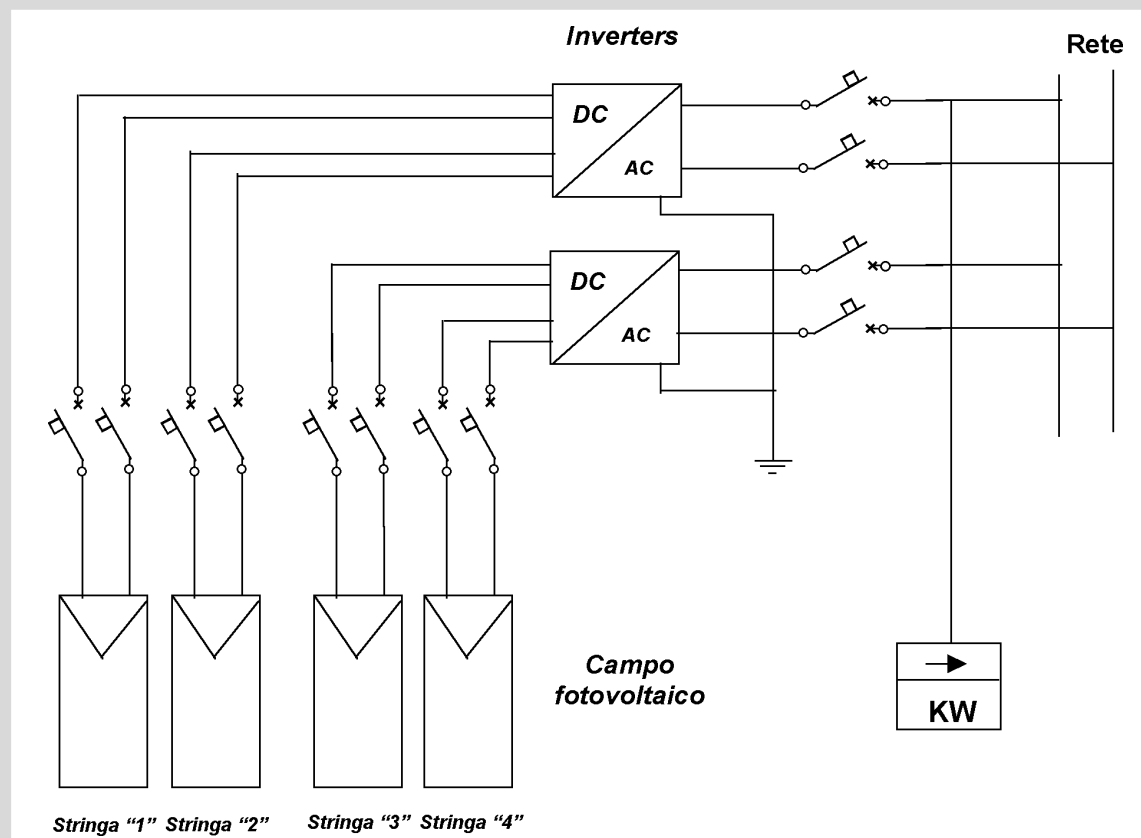
- **Moduli fotovoltaici**
- **Inverter per la connessione in rete**
- **Dispositivo di interfaccia con la rete elettrica**
- **Contatore di energia bidirezionale**

L'**inverter** è un componente tra i più importanti nei sistemi collegati in rete perché massimizza la produzione di corrente del dispositivo fotovoltaico ed ottimizza il passaggio di energia tra il modulo fotovoltaico ed il carico.

L'**inverter** è un dispositivo che trasforma l'energia continua prodotta dai moduli (12V, 24V, 48V, ..) in energia alternata (generalmente 220V) per alimentare il carico-utente e/o immetterla nella rete, con la quale lavora in regime di interscambio.

Gli **inverters** per il collegamento alla rete elettrica generalmente sono dotati di un dispositivo elettronico che permette di estrarre la massima potenza, istante per istante, dal generatore fotovoltaico. Tale dispositivo è l'inseguitore del punto di massima potenza (MPPT) ed ha appunto lo scopo di adattare le caratteristiche di produzione del campo fotovoltaico alle esigenze del carico.

Figura 9 - Schema elettrico indicativo di un impianto fotovoltaico connesso in rete



L'importanza dell'**inverter** è legata al fatto che un generatore fotovoltaico fornisce valori di tensione e corrente variabili in funzione dell'irraggiamento e della temperatura, mentre il carico necessita, solitamente, di un valore costante della tensione di alimentazione.

Il **dispositivo di interfaccia con la rete** ha lo scopo di fare in modo che la forma d'onda dell'energia elettrica immessa in rete abbia tutte le caratteristiche richieste dal fornitore locale di energia.

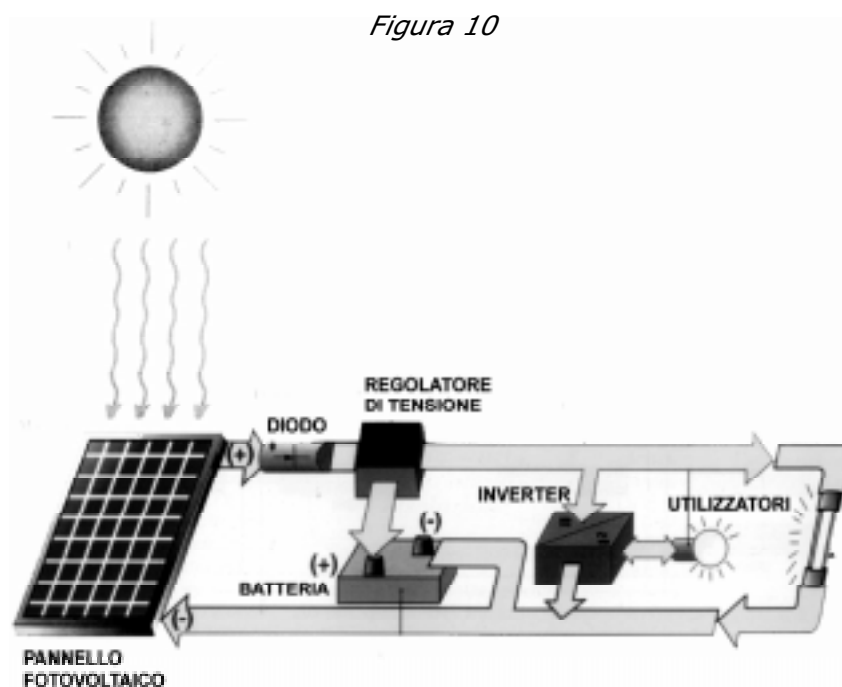
Per ultimo, il **contatore di energia** misura l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico durante il suo periodo di funzionamento.

## 6. Impianti fotovoltaici “Stand Alone”

I principali componenti che costituiscono un impianto fotovoltaico isolato sono:

- **Moduli fotovoltaici**
- **Regolatore di carica**
- **Inverter**
- **Sistema di accumulo (batterie di accumulo)**

In tale tipologia di impianti, l'energia prodotta dai moduli fotovoltaici viene immagazzinata in batterie di accumulo. Il carico viene alimentato, attraverso il regolatore di carica, dall'energia accumulata nelle batterie.



Il **regolatore di carica** serve sostanzialmente a preservare gli accumulatori da un eccesso di carica ad opera del generatore fotovoltaico e da un eccesso di scarica dovuto all'utilizzazione. Entrambe le condizioni sono nocive per la corretta funzionalità e la durata degli accumulatori.

Poiché generalmente la potenza richiesta dall'utente non segue l'intensità della radiazione solare (e di conseguenza della produzione elettrica di un impianto fotovoltaico) una parte dell'energia prodotta dal campo fotovoltaico deve essere immagazzinata per poi essere riutilizzata quando necessario dall'utente. E' questo lo scopo del **sistema di accumulo**.

Un sistema di accumulo è costituito da un banco di accumulatori ricaricabili, dimensionato in modo da garantire la sufficiente autonomia di alimentazione del carico elettrico. Le batterie che vengono utilizzate per tale scopo sono accumulatori di tipo stazionario e solo in casi molto particolari è possibile utilizzare batterie tipo per autotrazione.

Le batterie per uso fotovoltaico devono avere i seguenti requisiti:

- **Basso valore di aut scarica**
- **Lunga vita stimata**
- **Manutenzione quasi nulla**
- **Elevato numero di cicli di carica-scarica**

Per quanto concerne invece l'**inverter**, il suo scopo nel caso di sistemi isolati è quello di trasformare l'energia elettrica di tipo continuo (CC) prodotta dal campo fotovoltaico in energia alternata (CA) necessaria per l'alimentazione diretta degli utilizzatori.

In tal caso l'**inverter** deve essere dimensionato in modo tale da riuscire ad alimentare direttamente il carico che si vuole ad esso collegare.

E' evidente che comunque l'**inverters** in questa tipologia impiantistica (impianti isolati) non è un componente indispensabile. Infatti è possibile anche fare in modo di alimentare direttamente in corrente continua a bassa tensione il carico.



## **7. Criteri di dimensionamento di un impianto fotovoltaico**

---

Di seguito vengono descritte le varie fasi del dimensionamento di un impianto fotovoltaico, allo scopo di fornire indicazioni sulla progettazione di un impianto completo.

### **7.1. Verifica idoneità del Sito**

- Presenza di ombre (vegetazione, costruzioni, alture)
- Nebbie o foschie mattutine
- Nevosità
- Ventosità

Queste informazioni determinano il collocamento del generatore fotovoltaico, la sua esposizione rispetto al Sud geografico, la maggiore inclinazione sul piano orizzontale, le caratteristiche delle strutture di sostegno.

### **7.2. Quantificazione del fabbisogno giornaliero di energia**

Il parametro da utilizzare come punto di partenza per il dimensionamento di un impianto fotovoltaico è l'energia intesa come

$$\text{Energia} = \text{Potenza} \times \text{tempo di utilizzo}$$

I consumi delle utenze isolate o collegate in rete da alimentare con il fotovoltaico devono essere considerati in termini di energia richiesta giornalmente. Ad esempio:

- n° 2 Lampade da 15 W da alimentare per 5 ore/giorno
- n° 1 TV color 60W da alimentare per 3 ore/giorno

$$\begin{aligned} \text{Energia giornaliera totale necessaria} &= 2 \times 15 \text{W} \times 5 \text{ ore/giorno} + 1 \times 60 \text{W} \times 3 \text{ ore/giorno} \\ &= 330 \text{ Wh/giorno} \end{aligned}$$

### **7.3. Scelta dell'inclinazione dei moduli**

L'inclinazione in genere viene scelta **pari alla latitudine del luogo**, questo naturalmente se non ci sono diverse esigenze di tipo architettonico.

### **7.4. Calcolo della potenza di picco del generatore fotovoltaico**

L'energia prodotta da un modulo è linearmente proporzionale alla radiazione solare incidente sulla superficie dei moduli solari.

E' quindi necessario effettuare tale calcolo basandosi sulle informazioni relative all'irraggiamento solare del sito.

Un metodo di calcolo generalmente utilizzato consiste nel rilevare tramite apposite tabelle, quelle che sono le ORE EQUIVALENTI del sito, alla inclinazione desiderata dei moduli fotovoltaici.

Si definisce **ORA EQUIVALENTE** il periodo di tempo in cui l'irraggiamento assume un valore pari a 1000 W/m<sup>2</sup>. In una zona del centro Italia, come indicazione di massima, considerando un'inclinazione dei moduli pari a 45°, il valore medio annuale di **tale parametro può essere pari a 3**.

Questa metodologia viene utilizzata, ai fini del calcolo di dimensionamento fotovoltaico, per determinare la quantità di energia prodotta giornalmente da un modulo fotovoltaico.

Con tale metodologia di calcolo, essendo noto il parametro Ora Equivalente mensile del sito, è possibile calcolare la potenza di picco del generatore fotovoltaico, infatti:

$$\text{Potenza di picco generatore fotovoltaico} = \frac{\text{Richiesta giornaliera di energia}}{\text{Ore Equivalenti}}$$

## 7.5. Valutazione delle perdite di impianto

E' necessario tener conto delle perdite/cadute di tensione introdotti dai componenti che costituiscono l'impianto (Inverter, batterie, regolatori di carica, cavi di collegamento,..)

Ipotizzando che le perdite totali dell'impianto siano intorno al 30%, allora è necessario aumentare della stessa percentuale la potenza di picco del generatore fotovoltaico.

## 7.6. Calcolo della potenza dell'inverter

La potenza dell'inverter viene determinata in modo differente a seconda che si tratti di impianto collegato in rete oppure in isola.

Nel primo caso la scelta dell'inverter è determinata dalle caratteristiche del campo fotovoltaico. Quindi, stabilita la potenza del generatore fotovoltaico (e di conseguenza il numero di moduli fotovoltaici), è direttamente identificabile il tipo di inverter da utilizzare.

Nel caso di impianto in isola invece, è necessario valutare la potenza totale massima che dovrà essere collegata all'inverter.

In particolare, se prendiamo l'esempio utilizzato per la valutazione del fabbisogno giornaliero di energia (punto 7.2.) si ha:

$$\text{Potenza totale} = 2 \times 15\text{W} + 1 \times 60\text{W} = 90\text{ W}$$

Il che significa che deve essere utilizzato un inverter la cui potenza nominale sia superiore a 90W.

Altra considerazione, sempre per la scelta dell'inverter per impianti in isola, è da farsi a proposito del tipo di inverter da usare.

A seconda della forma d'onda prodotta infatti, esistono differenti tipologie di inverter:

- ad onda sinusoidale pura
- ad onda trapezoidale
- ad onda quadra

I primi sono quelli che riproducono una forma d'onda praticamente identica a quella della rete elettrica e quindi permettono di alimentare qualsiasi tipo di carico. Le altre due tipologie possono invece non alimentare correttamente, ad esempio, dei carichi di tipo elettronico.

## **7.7. Dimensionamento del sistema di accumulo (solo per impianti "in isola")**

In caso di bassi livelli di insolazione, è evidente che l'impianto fotovoltaico ha una produzione inferiore a quella ottenuta in giorni con insolazione ottimale.

E' possibile dimensionare l'accumulo in modo tale da garantire una alimentazione del carico, anche per un certo numero massimo di giorni consecutivi con assenza di insolazione.

## 8. Costi di un impianto fotovoltaico

---

La peculiarità di un impianto fotovoltaico è che questo richiede un forte impegno di capitale iniziale e basse spese di manutenzione.

L'analisi di tutti gli aspetti economici relativi ad un impianto fotovoltaico è complessa. Infatti è necessario tener conto delle seguenti considerazioni:

- Ogni installazione deve essere valutata nel suo particolare contesto (condizioni locali, normative, irraggiamento solare, aree disponibili, etc.).
- Per poter fare un corretto confronto è necessario parlare di **valore** dell'energia prodotta e non di costo dell'energia. Ciò perché la qualità dell'energia prodotta da fonte fotovoltaica non è la stessa di quelle delle fonti tradizionali (impatto ambientale, intermittenza dell'energia, etc.).
- La vita di un generatore fotovoltaico, può essere a oggi stimata intorno ai 25 anni. Alcune aziende rilasciano garanzie di durata per questo periodo.
- Difficoltà di collegamento alla rete elettrica (rifugi alpini, case isolate, etc.).

Tanto per dare indicazioni di massima relativamente ai costi di un impianto fotovoltaico, di seguito si danno alcune stime di costo per kWp installato:

- Impianti integrati negli edifici (o connessi a rete)      ≈ € 8.000/kWp (iva esclusa)
- Impianti per utenze isolate      ≈ € 10.000/kWp (iva esclusa)

Ci sono casi in cui l'investimento iniziale è già ammortizzato, poiché il costo per elettrificare l'utenza è superiore a quello dell'installazione di un impianto solare fotovoltaico.

Nella maggior parte dei casi però un impianto fotovoltaico ha un costo per kWh prodotto notevolmente superiore al costo del kWh acquistato dalla rete elettrica. Ne consegue che la convenienza all'installazione di un impianto fotovoltaico dipende fortemente da eventuali forme di incentivazioni.

Per poter ottenere un costo per kWh prodotto da un impianto fotovoltaico paragonabile al kWh acquistato dalla rete, è necessario intervenire con contributi finanziari percentualmente molto elevate (superiori al 70-80%).

In Italia nel 2001 è stato avviato un progetto nazionale denominato **Tetti Fotovoltaici**. Tale progetto però presentava molti punti critici per lo sviluppo del settore fotovoltaico di cui alcuni sono di seguito riassunti:

1. Campagna pubblicitaria ed informazioni degli organi preposti a dare informazione non chiara ed in certi casi falsa.
2. Finanziamenti estremamente limitati (circa 30/40 progetti finanziabili per regione a fronte di centinaia di domande).
3. Anticipo da parte del cliente del denaro per l'acquisto dell'impianto fotovoltaico.

4. Limite massimo del costo/impianto (che favorisce lo sviluppo di impianti di bassa qualità).
5. Nessuna indicazione sulla qualità dei moduli (efficienza, prestazioni, etc).
6. Nessun rimborso dei kWh prodotti dall'impianto (ma solo un conguaglio fra produzione e consumo).
7. Incertezza sulla omologazione finale dell'impianto.

Un progetto semplice ma che si è rivelato estremamente efficace per promuovere il settore del solare fotovoltaico è stato messo a punto in Germania. Infatti è stato avviato nei primi mesi del 2000 un programma nazionale in cui:

1. Non vengono dati contributi a fondo perduto.
2. Sono previsti invece finanziamenti a tasso agevolato della durata di 10 anni.
3. Le agevolazioni sono collegate all'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico: infatti ogni kWh prodotto è venduto ad una Tariffa di € 0,5 (circa 3 volte il costo di acquisto del kWh dalla rete).

Tale programma ha permesso la realizzazione di impianti fotovoltaici concepiti innanzi tutto come **investimento**. In secondo luogo ha permesso la realizzazione di impianti ad elevata efficienza e di elevata qualità in modo da ottenere da essi la maggior produzione possibile.

Infine gli utenti sono stati stimolati ad una puntuale ed efficiente manutenzione.

## 9. Impatto ambientale

---

L'impatto ambientale delle fonti rinnovabili è ridotto o nullo, in particolare per quanto riguarda il rilascio di inquinanti nell'aria e nell'acqua. Esse contribuiscono così alla riduzione dei gas responsabili dell'effetto serra e delle piogge acide.

Per quanto riguarda la conversione fotovoltaica dell'energia solare, questa ha tali caratteristiche che può essere ritenuta la sorgente rinnovabile più rispettosa dell'ambiente.

Gli impianti fotovoltaici non sono fonte di emissioni inquinanti, sono esenti da vibrazioni e, data la loro modularità, possono assecondare la morfologia dei siti di installazione. Inoltre, possono produrre energia in prossimità dei carichi elettrici, evitando le perdite di trasmissione.

Il loro impatto ambientale, tuttavia, non può essere considerato nullo. I problemi e le tipologie di impatto ambientale che possono influire negativamente sull'accettabilità degli impianti fotovoltaici si possono ricondurre a:

- **l'inquinamento derivante dal processo produttivo dei componenti,**
- **l'utilizzazione del territorio,**
- **l'impatto visivo,**
- **l'impatto su flora, fauna, e clima locale.**

Per quanto riguarda il primo punto, l'uso di materie prime, di energia e di conseguenza le emissioni provocate dal processo di produzione dipendono dalla tecnologia usata. I sistemi fotovoltaici più diffusi sono quelli basati sul silicio (elemento estremamente diffuso sulla terra) monocristallino, policristallino ed amorfo.

Il processo di fabbricazione in sé non comporta un uso apprezzabile di sostanze pericolose o inquinanti e va anche considerato che, con le dimensioni attuali del mercato fotovoltaico, il silicio proviene dal reimpiego degli scarti dell'industria elettronica.

Per alcuni tipi di celle vengono segnalati possibili rischi in caso di incendio, per la formazione di gas tossici. Inoltre, sempre per lo stesso motivo, i pannelli fotovoltaici alla fine della loro vita devono essere smaltiti con adeguati sistemi di riciclaggio.

Il fabbisogno di territorio dipende dal modo di impiego del fotovoltaico: decentrato o centralizzato in grandi impianti.

Nel primo caso il territorio utilizzato può essere ridotto quasi a zero perché il fotovoltaico può essere installato su superfici già sottratte all'ambiente natu-

rare, come tetti, facciate e terrazze degli edifici esistenti, coperture di parcheggi o, in genere, di aree di servizio su scarpate, bordi di autostrade, ecc. Il potenziale per l'uso decentrato dei sistemi fotovoltaici può ritenersi di conseguenza piuttosto ampio.

**La sua penetrazione è tuttavia legata ad una drastica riduzione dei costi attuali.**

Nel caso di produzione fotovoltaica in impianti centralizzati multimegawatt, il fabbisogno di energia è legato a vari fattori come l'efficienza di conversione dei moduli e le caratteristiche di insolazione del sito. In ogni caso l'uso di impianti centralizzati richiede notevoli estensioni di territorio per poter dare un contributo apprezzabile.

In alcuni casi motivi estetici hanno portato al rifiuto dei sistemi fotovoltaici. In generale l'impatto visivo dipende soprattutto dalle dimensioni dell'impianto. Ricordiamo che ciò non rappresenta un problema nel caso dell'uso decentrato del fotovoltaico, dato che gli impianti possono essere bene integrati sui tetti o sulle facciate degli edifici.

Un impianto fotovoltaico di media o grande dimensione può invece avere un impatto visivo non trascurabile, che dipende sensibilmente dal tipo di paesaggio (di pregio o meno).

I problemi finora riscontrati riguardano le grandi superfici riflettenti. Il disturbo è legato all'orientamento di tali superfici rispetto ai possibili punti di osservazione e può essere mitigato rispettando opportune distanze dagli abitati, dalle strade ecc., ovvero schermando con elementi arborei o arbustivi i suddetti punti di osservazione, fatta salva, ovviamente, l'esigenza di evitare ombreggiamenti del campo fotovoltaico.

Per l'uso decentrato dei sistemi fotovoltaici l'impatto sulla fauna e sulla flora è ritenuto generalmente trascurabile, in quanto sostanzialmente riconducibile al suolo e all'habitat sottratti, data anche l'assenza di vibrazioni e rumore. Non è possibile escludere effetti negativi, anche se temporanei e di entità modesta, durante la fase di realizzazione di grossi impianti.

Per quanto riguarda la sottrazione di radiazione solare da parte dei pannelli all'ambiente circostante, che in linea teorica potrebbe indurre modificazioni sul microclima locale, occorre ricordare che soltanto il 10% circa dell'energia solare incidente nell'unità di tempo sulla superficie del campo fotovoltaico, viene trasformata e trasferita altrove sotto forma di energia elettrica (il resto viene riflesso o passa attraverso i moduli).

Pertanto, pur nella diversità dei contesti ambientali, territoriali, sociali, istituzionali, dalle esperienze maturate è emerso che anche tecnologie soft nei confronti dell'ambiente, come quella fotovoltaica, non sono esenti da impatti sull'ambiente e possono incontrare difficoltà di accettazione da parte delle popolazioni.

La dimensione e la significatività di questi impatti sono tuttavia decisamente inferiori rispetto a quelle di altre tecnologie energetiche tradizionali, anche se tali talvolta da poter provocare opposizioni difficili da superare.

Con questi accorgimenti, i passaggi successivi, cioè l'individuazione del sito, la progettazione degli impianti e lo svolgimento dell'iter autorizzativo, possono avere esiti migliori in presenza di accurate valutazioni preventive dei possibili disturbi ambientali indotti dagli impianti.



## 10. Indirizzi utili

---

### Gli operatori istituzionali

#### **AUTORITÀ PER L'ENERGIA ELETTRICA E IL GAS**

Piazza Cavour, 5 - 20121 Milano

tel: 02 655651 (centralino) - fax: 02 65565222 / 02 65565266

[www.autorita.energia.it](http://www.autorita.energia.it)

#### **MINISTERO DELL'AMBIENTE**

Via Cristoforo Colombo, 44 - 00154 Roma

tel: 06 57221

INK[www.minambiente.it](http://www.minambiente.it)

#### **MINISTERO DELLE ATTIVITA' PRODUTTIVE**

##### **Servizio Risparmio Energetico e Fonti Rinnovabili**

Via Molise, 2 - 00187 Roma

tel: 06 47051 (centralino) - 4705 2023

[www.minindustria.it](http://www.minindustria.it)

#### **ENEA - Divisione Fonti Rinnovabili**

Via Anguillarese, 301 - 00060 S. Maria di Galeria (RM)

tel: 06 30481

[www.enea.it](http://www.enea.it)

### I principali produttori di moduli fotovoltaici operanti in Italia

#### **ACCOMANDITA - TSE srl**

Strada S. Giuseppe, 19 - 43039 SALSOMAGGIORE TERME (PR)

Responsabile settore fotovoltaico: Ing. Marco Prosperi

Tel. 0524/523668 - Fax. 0524/522145

E-Mail: [accomandita@polaris.it](mailto:accomandita@polaris.it)

Internet: <http://www.accomandita.com>

##### **Filiali:**

- 20141 MILANO - Via Medeghino, 3 - Tel. 02/89500642 - Fax. 02/8467734
- 00131 ROMA - Via Pietraferrazzana, 22 - Tel. 06/4131354 - Fax. 4131054
- 39040 BOLZANO - Cortaccia - Via Adige, 3 - Tel. 0471/818176 - Fax. 0471/818175
- 33010 UDINE - Feletto Umberto - Via Buonarroti, 30 - Tel. 0432/574270 - Fax. 0432/574287
- 16121 GENOVA - Piazza della Vittoria, 11 int. 16/A - Tel. 010/588565 - Fax. 010/589356

#### **DEA srl - Distribuzione Energie Alternative**

Via Anita Garibaldi, 22 - 04010 GIULIANELLO DI CORI (LT)

Tel e Fax 06.9665265

E-mail: [deasrl@tiscalinet.it](mailto:deasrl@tiscalinet.it)

Internet: <http://www.deasrl.it>

##### **Sedi Commerciali:**

- TERNI - Via del Convento, 32 - Tel. 0744.812409
- LISSONE (MI) - Via Aliprandi 24 - Tel. 039.2455720

#### **ENERGIA SOLARE srl**

Strada Saluzzo, 75/a - 10041 CARIGNANO (TO)

Tel. e Fax 011.9693135

E-mail: [energisol@venturanet.it](mailto:energisol@venturanet.it)

Internet: [www.venturanet.it/solar](http://www.venturanet.it/solar)

**ENERTEC di Stefano Griffa**  
**Energie alternative e prodotti a risparmio energetico**  
Corso Milano, 29 - 14100 ASTI  
Tel. 0141.530084 - Fax 0141.437952

**EUROSOLARE spa**  
Via Augusto D'Andrea, 6 - 00046 NETTUNO  
Tel 06-985601 - Fax 06-9850267  
E-mail: eurosolare@eurosolare.agip.it

**FLOATEX srl**  
Via Cave, 12 - 25050 PROVAGLIO D'ISEO (BS)  
Tel 030/9823598 - Fax 030.9823599  
E-mail: floatex@galactica.it

**GEHELIN GROUP Sistemi Fotovoltaici**  
Via Ticino, 16 - 36016 THIENE (VI)  
Tel. 0445.380050 - Fax 0445.381020  
E-mail: gechelin@gechelin.com  
Internet: www.gechelin.com

**Agente**  
TECNOSOLAR srl  
Via A. Meucci, 10 - 80020 CASAVATORE (NA)  
Tel. e Fax 081.7364704

**G.T.S. spa**  
Via G.B. Brocchi, 15 - 20131 MILANO  
Tel. 02.26666889 - Fax 02.2666912  
E-mail: gts@netitalia.it

**HELIOS TECHNOLOGY srl**  
Via Postumia, 11 - 35010 CARMIGNANO DI BRENTA (PD)  
Tel. 049-9430288 - Fax 049-9430323  
E-mail: helios-technology@mediacity.it

**SOLARES di Ing. L. LA SPADA**  
Via F. Lattanzio, 53 - 70126 BARI  
Tel. 080.5542267 - Fax 080-5589323

**TECNOSOLAR**  
Via Padula inferiore, 41 - 87040 S. PIETRO IN GUARANO  
Tel. e Fax 0984.442880  
E-mail: tecnosol@tin.it