



# SCHEDA TECNICA DELLA CENTRALE FOTOVOLTAICA

## Impianto fotovoltaico per Conto Energia

Un impianto fotovoltaico è essenzialmente costituito da un "generatore", da un "sistema di condizionamento e controllo della potenza" e da un eventuale "accumulatore" di energia, la batteria, e naturalmente dalla struttura di sostegno.

## Il generatore fotovoltaico

Il componente elementare di un generatore fotovoltaico è la cella. È lì che avviene la conversione della radiazione solare in corrente elettrica.

Essa è costituita da una sottile fetta di un materiale semiconduttore, quasi sempre silicio opportunamente trattato, dello spessore di circa 0,3mm. Può essere rotonda o quadrata e può avere una superficie compresa tra i 100 e i 225cm<sup>2</sup>.

La cella si comporta come una minuscola batteria e nelle condizioni di soleggiamento tipiche dell'Italia (1kW/m<sup>2</sup>), alla temperatura di 25°C fornisce una corrente di 3A, con una tensione di 0,5V e una potenza pari a 1,5-1,7Wp. In commercio troviamo i moduli fotovoltaici che sono costituiti da un insieme di celle. I più diffusi sono costituiti da 36 celle disposte su 4 file parallele collegate in serie. Hanno superfici che variano da 0,5 a 1m<sup>2</sup> e permettono l'accoppiamento con gli accumulatori da 12Vcc nominali. Più moduli collegati in serie formano un pannello, ovvero una struttura comune ancorabile al suolo o ad un edificio. Più pannelli collegati in serie costituiscono una stringa. Più stringhe, collegate generalmente in parallelo per fornire la potenza richiesta, costituiscono il generatore fotovoltaico. Dal punto di vista elettrico non ci sono praticamente limiti alla produzione di potenza da sistemi fotovoltaici, perché il collegamento in parallelo di più file di moduli, le "stringhe", consente di ottenere potenze elettriche di qualunque valore. Il trasferimento dell'energia dal sistema fotovoltaico all'utenza avviene attraverso ulteriori dispositivi necessari a trasformare la corrente continua prodotta in corrente alterna, adattandola alle esigenze dell'utenza finale.

## Il sistema di condizionamento e controllo della potenza

È costituito da un inverter, che trasforma la corrente continua prodotta dai moduli in corrente alternata; da un trasformatore e da un sistema di rifasamento e filtraggio che garantisce la qualità della potenza in uscita. Trasformatore e sistema di filtraggio sono normalmente inseriti all'interno dell'inverter. È chiaro che il generatore fotovoltaico funziona solo in presenza di luce solare. L'alternanza giorno/notte, il ciclo delle stagioni, le variazioni delle condizioni meteorologiche fanno sì che la quantità di energia elettrica prodotta da un sistema fotovoltaico non sia costante né al variare delle ore del giorno, né ne al variare dei mesi dell'anno. Ciò significa che, nel caso in cui si voglia dare la completa autonomia all'utenza, occorrerà o collegare gli impianti alla rete elettrica di distribuzione nazionale o utilizzare dei sistemi di accumulo dell'energia elettrica che la rendano disponibile nelle ore di soleggiamento insufficiente.

La quantità di energia prodotta da un generatore fotovoltaico varia nel corso dell'anno e dipende da una serie di fattori come la latitudine e l'altitudine del sito, l'orientamento e l'inclinazione della superficie dei moduli, e le caratteristiche di assorbimento e riflessività del territorio circostante. A titolo indicativo alle latitudini dell'Italia centro-meridionale un metro quadrato di moduli può produrre in media 0,3-0,4kWh al giorno nel periodo invernale, e 0,6-0,8kWh in quello estivo.

### Caratteristiche dell'impianto

La potenza di un impianto fotovoltaico si misura con la somma dei valori di potenza nominale di ciascun modulo fotovoltaico di cui è composto il suo campo, e l'unità di misura più usata è il chilowatt picco (simbolo: kWp). La superficie occupata da un impianto fotovoltaico è in genere poco maggiore rispetto a quella occupata dai soli moduli fotovoltaici, che richiedono, con le odierne tecnologie, circa 8 m<sup>2</sup> / kWp ai quali vanno aggiunte eventuali superfici occupate dai coni d'ombra prodotte dai moduli stessi, quando disposti in modo non complanare. Negli impianti installati su terreno o su un tetto piano di solito si posizionano i pannelli in file geometriche, opportunamente sollevate singolarmente verso il sole, in modo da massimizzare l'irraggiamento captato dai moduli. In entrambe le configurazioni di impianto, ad isola o connesso, l'unico componente disposto in esterni è il campo fotovoltaico, mentre regolatore, inverter e batteria sono tipicamente disposti in locali tecnici predisposti. La prassi vuole che gli impianti fotovoltaici vengano suddivisi per dimensione in 3 grandi famiglie, con un occhio di riguardo soprattutto a quelli connessi alla rete:

- Ø Piccoli impianti: con potenza nominale inferiore a 20 kWp;
- Ø Medi impianti: con potenza nominale compresa tra 20 kWp e 50 kWp;
- Ø Grandi impianti: con potenza nominale maggiore di 50 kWp.

Questa classificazione è stata in parte dettata dalla stessa normativa italiana del Conto energia.

### Impianto fotovoltaico di potenza fino a 20 kWp

Un impianto di queste dimensioni è indicato per l'installazione su abitazioni di uso privato o attività commerciali e piccole imprese. L'energia prodotta è di norma destinata a ridurre i prelievi dalla rete e livellare i costi della fornitura di energia elettrica. Questi impianti non richiedono particolari costi di manutenzione o costi di gestione.

### Impianto fotovoltaico di potenza superiore a 20 kWp

Un impianto di queste dimensioni è generalmente adatto per quelle imprese interessate oltre che alla riduzione dei costi di fornitura anche al guadagno che si può ricavare dalla vendita dell'energia elettrica prodotta. I costi di esercizio salgono lievemente mentre rimane immutato il rapporto tra impianto e manutenzione. Alcuni costi aggiuntivi possono derivare dalla necessità di installare una linea elettrica dedicata al trasporto dell'energia prodotta.

Gli impianti fotovoltaici sono generalmente suddivisi in due grandi famiglie: impianti isolati, o stand-alone, e impianti connessi alla rete, o grid-connected.

### Impianto fotovoltaico isolato o stand-alone

Questa famiglia identifica quelle utenze elettriche isolate da altre fonti energetiche, come la rete nazionale in AC, che si riforniscono da un impianto fotovoltaico elettricamente isolato ed autosufficiente. I principali componenti di un impianto fotovoltaico ad isola sono generalmente:

- Ø Campo fotovoltaico, deputato a raccogliere energia mediante moduli fotovoltaici disposti opportunamente a favore del sole;
- Ø Regolatore di carica, deputato a stabilizzare l'energia raccolta e a gestirla all'interno del sistema;
- Ø Batteria di accumulo, deputata a conservare l'energia raccolta in presenza di irraggiamento solare per permetterne un utilizzo differito da parte dei carichi elettrici.

In questa configurazione di impianto, i carichi elettrici (ivi compreso un eventuale inverter che serva utilizzi in corrente alternata) sono direttamente connessi al regolatore di carica, che funge da vero e proprio supervisore di sistema. Il campo fotovoltaico in genere impiegato per gli impianti ad isola è ottimizzato per uno specifico voltaggio di sistema, deciso solitamente in fase di progettazione del sistema stesso. I voltaggi più utilizzati sono 12, 24 o più raramente 48 V. L'accumulatore è in genere costituito da monoblocchi o elementi singoli specificamente progettati per cariche e scariche profonde e cicliche. Non sono in genere impiegati accumulatori per uso automobilistico, che pur funzionando a dovere vengono rapidamente esauriti nelle prestazioni a causa della gravosità di questo impiego. Il regolatore di carica ha tra le sue funzionalità più tipiche quelle di:

- ∅ stacco del campo fotovoltaico dalla batteria in caso di voltaggio inferiore a quello utile a quest'ultima, come ad esempio dopo il tramonto;
- ∅ stacco del campo fotovoltaico dalla batteria in caso di ricarica totale di quest'ultima;
- ∅ stacco dei carichi elettrici dalla batteria in caso di scarica profonda di quest'ultima.

### Impianto fotovoltaico connesso alla rete

Questa famiglia identifica quelle utenze elettriche già servite dalla rete nazionale in AC, ma che iniettano in rete la produzione elettrica risultante dal loro impianto fotovoltaico, opportunamente convertita in corrente alternata e sincronizzata a quella della rete. Gli impianti di questo tipo sono di recente adozione, e sono comunemente anche chiamati "impianti in conto energia", dalla normativa che attualmente li regola. Ciò nonostante, l'applicazione del conto energia a questi impianti ha conseguenze scarse se non nulle da un punto di vista tecnico. Si consideri infatti che vi sono attualmente moltissimi impianti grid-connected funzionanti perfettamente pur non applicandolo. I principali componenti di un impianto fotovoltaico connesso alla rete sono:

- ∅ Campo fotovoltaico, deputato a raccogliere energia mediante moduli fotovoltaici disposti opportunamente a favore del sole;
- ∅ Inverter, deputato a stabilizzare l'energia raccolta, a convertirla in corrente alternata e ad iniettarla in rete;
- ∅ Quadrante di protezione e controllo, da situare in base alle normative vigenti tra l'inverter e la rete che questo alimenta.

In questi impianti la rete costituisce la cosiddetta "batteria infinita", prendendo in carico tutta l'energia in uscita dall'inverter, per poi rilasciarla a richiesta degli utilizzi dell'utente. Si tratta in effetti di una batteria virtuale, in quanto è praticamente impossibile che venga rilasciata fisicamente la stessa energia iniettata in rete alcune ore prima. Piuttosto i vari gestori di rete sono chiamati dalla vigente normativa italiana a fornire il servizio di batteria infinita a titolo gratuito, fatte salve le spese di gestione, che si concretizzano in genere nel canone annuo di locazione di un contatore piombabile, dedicato esclusivamente alla produzione elettrica, e connesso a quello di consumo per permettere di autoconsumare sul posto, iniettare in rete o prelevare dalla rete l'energia in modo trasparente. Se questo servizio è a titolo non oneroso, ovvero se viene fornito a privati, prende tecnicamente il nome di net metering. Questo tipo di impianti, grazie alle incentivazioni stabilite dai paesi ratificanti il Protocollo di Kyoto, e concretizzatesi in Italia con il cosiddetto Conto energia, hanno avuto un aumento esponenziale di applicazioni.

### BIPV o Integrazione Architettonica dell' Impianto

Una menzione a parte va al cosiddetto BIPV, acronimo di Building Integrated PhotoVoltaics, ovvero Sistemi fotovoltaici ad alta integrazione architettonica. L'integrazione architettonica si ottiene posizionando il campo fotovoltaico dell'impianto all'interno del profilo stesso dell'edificio che lo accoglie.

Le integrazioni architettoniche consentono all'utente di essere destinatario di tariffe in conto energia più vantaggiose, anche se i costi di integrazione sono leggermente più alti dei costi di installazione senza integrazione.

---

Le tecniche sono principalmente 3:

- Ø Sostituzione locale del manto di copertura (es. tegole o coppi) con un rivestimento idoneo a cui si sovrappone il campo fotovoltaico, in modo che questo risulti affogato nel manto di copertura;
- Ø Impiego di tecnologie idonee all'integrazione, come il silicio amorfo e/o policristallino.
- Ø Impiego di moduli fotovoltaici strutturali, ovvero che integrano la funzione di infisso, con o senza vetrocamera.
- Ø Un impianto fotovoltaico trasforma direttamente l'energia solare in energia elettrica sfruttando le proprietà del principale elemento da cui è composto, il silicio. Esso è costituito essenzialmente da:
  - Ø Moduli o pannelli fotovoltaici;
  - Ø Inverter, che trasforma la corrente continua generata dai moduli in corrente alternata;
  - Ø Quadri elettrici e cavi di collegamento.

I moduli sono costituiti da celle in materiale semiconduttore, il più utilizzato dei quali è il silicio cristallino. Essi rappresentano la parte attiva del sistema perché convertono la radiazione solare in energia elettrica. L'impianto fotovoltaico può essere connessi alla rete elettrica di distribuzione (grid-connected) o direttamente a utenze isolate (stand-alone), tipicamente per assicurare la disponibilità di energia elettrica in zone isolate.

L'impianto fotovoltaico è un impianto per la produzione di energia elettrica. Tramite i pannelli fotovoltaici si può trasformare direttamente l'energia solare incidente sulla superficie terrestre in energia elettrica, sfruttando le proprietà del silicio, largamente usato per molti dispositivi elettronici di moderna concezione.

I vantaggi:

- Ø Nessuna emissione inquinante di qualsiasi tipo
- Ø No viene utilizzato alcun combustibile per la produzione dell'energia
- Ø Affidabilità e durata dell'impianto garantita per 25 anni
- Ø Minimi costi di manutenzione
- Ø Modularità dell'impianto ( per aumentare la produzione basta aumentare il numero dei pannelli fotovoltaici e inverter)

Gli svantaggi:

- Ø Rendimento dipendente dalla variabilità dell'irraggiamento solare (di inverno il rendimento è inferiore rispetto all'estate)
- Ø Necessaria disponibilità di elevato spazio, in aree di distanti da tutti gli ostacoli all'irraggiamento solare (case, alberi).

Le applicazioni:

- Ø • Impianti per utenze collegate a bassa tensione
- Ø • Centrali fotovoltaiche collegate alla rete in media tensione
- Ø • Impianti per utenze isolate con batterie (Baite, Rifugi, Segnalazione stradale, ecc)
- Ø • Piccole reti isolate (villaggi, piccole isole, ecc ecc)

## Le parti

Un impianto fotovoltaico è costituito da 5 elementi:

- Ø pannelli fotovoltaici
- Ø strutture di sostegno dei pannelli
- Ø inverter
- Ø misuratori di energia
- Ø quadri elettrici e cavetteria di collegamento

I pannelli fotovoltaici sono delle strutture contenenti le celle fotovoltaiche di silicio ( vedi descrizioni dettagliate nel prossimo paragrafo ) .

Le strutture di sostegno dei pannelli servono a posizionare e mantenere i moduli nella giusta inclinazione (in Italia è di circa 30°), ciò al fine di massimizzare le proprietà, che hanno le celle, di catturare e trasformare dell'energia solare. Le strutture sono costituite da alluminio o acciaio zincato e vengono ancorate al tetto o al suolo mediante viti o altri elementi di ancoraggio. Alcuni impianti utilizzano delle strutture di sostegno che durante l'arco della giornata cambiano inclinazione e l'orientamento dei moduli. Questa funzione permette all'impianto di seguire il sole e conseguentemente di aumentare la producibilità elettrica. Questo tipo di strutture, il cui movimento prende spunto da quello dei girasoli, vengono chiamate "inseguitori" o "tracker".

Gli inverter hanno il compito di convertire l'energia prodotta dai moduli, da corrente continua in corrente alternata.

I misuratori di energia sono strumenti che hanno lo scopo di conteggiare l'energia elettrica consumata e quella immessa nella rete del gestore GRTN.

L'insieme dei cavi, quadri elettrici, interruttori e altri dispositivi completano l'attrezzatura necessaria al completamento dell'impianto fotovoltaico.

# Pannelli-Solari

I pannelli fotovoltaici sono delle strutture contenenti le celle fotovoltaiche di silicio; le celle possono essere di tipo monocristallino, policristallino o amorfo. I pannelli fotovoltaici, chiamati anche moduli fotovoltaici, sono costituiti da singole celle solari. Ogni pannello fotovoltaico ha una dimensione variabile da 0,5 a 1 m<sup>2</sup> con potenze da 50Wp a 200Wp e un peso che varia tra i 9 e 18 kg. Un insieme di pannelli fotovoltaici collegati elettricamente costituisce una stringa; un insieme di stringhe collegate in parallelo tra di loro, formano il campo fotovoltaico che, insieme ad altri componenti, consente di realizzare i sistemi fotovoltaici utilizzabili per la produzione di energia elettrica utile.

Dei molti materiali impiegabili per la costruzione dei moduli fotovoltaici, il [silicio](#) è in assoluto il più utilizzato. Se si limita l'analisi ai soli prodotti commerciali, le tecnologie di realizzazione più comuni sono:

## Moduli cristallini

- Ø Silicio monocristallino, in cui ogni cella è realizzata a partire da un wafer la cui struttura cristallina è omogenea ([monocristallo](#))
- Ø Silicio policristallino, in cui il wafer di cui sopra non è strutturalmente omogeneo ma organizzato in grani localmente ordinati ([policristallo](#));

## Moduli a film sottile

Silicio microsferico montato su modulo flessibile.

Silicio amorfo, in cui gli atomi silicei vengono depositi chimicamente in forma amorfa, ovvero strutturalmente disorganizzata, sulla superficie di sostegno. Questa tecnologia impiega quantità molto esigue di silicio (spessori dell'ordine del micron). I moduli in silicio amorfo dimostrano in genere di una efficienza meno costante delle altre tecnologie rispetto ai valori nominali, pur avendo garanzie in linea con il mercato.

## Certificazioni

I moduli fotovoltaici in commercio vengono testati in base alla normativa IEC 61215, per determinare le caratteristiche sia elettriche che meccaniche. Tra i test più importanti si cita quello per determinarne la **potenza** in condizioni di insolazione standard, espressa in **watt picco** (Wp).

## I prodotti in commercio

I moduli fotovoltaici in silicio cristallino più comuni hanno dimensioni variabili da 0,5 m<sup>2</sup> a 1,5 m<sup>2</sup>, con punte di 2,5 m<sup>2</sup> in esemplari per grandi impianti. Non vi è comunque particolare interesse a costruire moduli di grandi dimensioni, a causa delle probabili perdite che l'impianto potrebbe subire a causa dell'ombreggiamento

La potenza più comune si aggira intorno ai 150 Wp a 24 V, raggiunti in genere impiegando 72 celle fotovoltaiche. La superficie occupata dai modelli commerciali si aggira in genere intorno ai 7,5 m<sup>2</sup>/kWp, ovvero sono necessari circa 7,5 metri quadrati di superficie per ospitare pannelli per un totale nominale di 1.000 Wp; un esempio: un modulo 50 Watt a 12Volt a mezzogiorno d'estate, produce 3,5 A (Ampere)

## Innovazioni

Ci sono diverse innovazioni in arrivo per quanto riguarda le tecnologie utilizzate per la produzione e il funzionamento dei pannelli fotovoltaici.

L'università di Toronto, per esempio, ha inventato un materiale plastico che sfruttando nano-tecnologie converte i raggi solari e infrarossi (quindi funziona anche con il tempo nuvoloso) in elettricità. Si prevede che costruendo i futuri pannelli fotovoltaici con questo materiale se ne aumenteranno le prestazioni di cinque volte. Può essere inoltre usato come generatore portatile e quindi essere spruzzato su superfici di altri materiali (ad esempio vestiti o su una batteria di auto a idrogeno).

## Dove installare

I moduli fotovoltaici possono essere installati su un tetto, pareti verticali o a terra, purché sussistano alcuni requisiti che sono necessari alla corretta esposizione dei pannelli al sole; in particolare:

- Ø Corretta inclinazione dei pannelli (30°-35°)
- Ø Disponibilità di spazio sufficiente (circa 8 mq per poter produrre 1 kWh di potenza)
- Ø Possibilità di esporre i pannelli verso sud, sud-est o sud-ovest
- Ø Assenza di ostacoli che mettano parte o tutti i pannelli in ombra

La non osservanza di questi requisiti comporta una diminuzione della producibilità massima ottenibile della corretta installazione dell'impianto fotovoltaico.

I pannelli possono essere integrati sul tetto o con la struttura portante poggiata sul tetto medesimo o, ancora, messi in posa su di un terreno.



Installazione su suolo

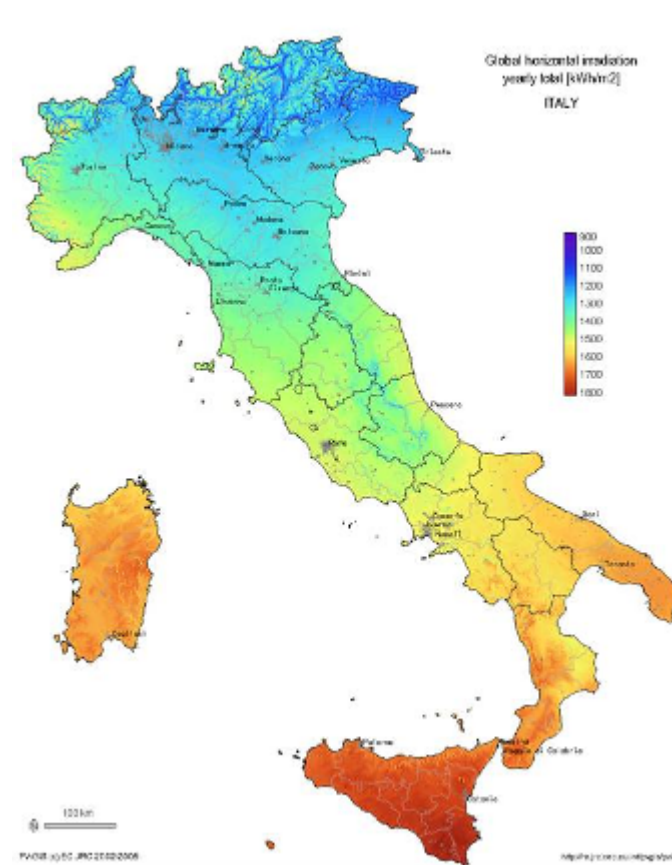
## Quanto produce

La capacità produttiva dei moduli fotovoltaici varia in base alla zona d'Italia dove sono posizionati; inoltre la potenza, che si esprime in Kilo Watt di Picco (kWp) dipende da una serie di altri fattori tra cui:

Durata della radiazione solare nel luogo specifico

- Ø Condizioni operative dei moduli
- Ø Variazioni climatiche durante l'anno
- Ø Dimensione dell'impianto stesso (mq di pannelli installati)

## Irradiazione in Italia



## Quanto dura

La vita utile di un impianto fotovoltaico è attestata intorno ai 25 anni per i pannelli. I moduli hanno un'ulteriore garanzia aggiuntiva sulla potenza prodotta: si garantisce una produzione non inferiore all'90% del nominale in 12 anni e dell'80% in 25 anni. Per effetto di queste garanzie, FE si impegna alla sostituzione delle parti che riconosce come difettose, esclusa ogni altra responsabilità od obbligo per danni diretti o indiretti eventualmente causati. Le riparazioni dei prodotti in garanzia saranno realizzati presso il servizio d'assistenza del produttore delle apparecchiature.

Gli inverter hanno una durata inferiore, ma sono elementi dal costo abbastanza contenuto e facilmente sostituibili, oltretutto coperti da garanzie estensibili anche a 12 anni dalla data di acquisto.

## Analisi dei costi

Di seguito, viene riportata una tabella che mostra in quale percentuale incidono i costi sul totale della spesa per l'installazione di un impianto fotovoltaico:

Parte dell'impianto	Percentuale del costo
Moduli o Pannelli fotovoltaici	60%
Sviluppo e studio del progetto	10%
Montaggio	14%
Inverter	10%
Struttura di sostegno o ancoraggio	5%

Il costo della manutenzione annuale ha un'incidenza dell'1 o 2 % sul costo dell'impianto.



## Benefici del fotovoltaico

### AMBIENTALI

Ø per produrre un chilowattora elettrico vengono bruciati mediamente l'equivalente di 2,56 kWh sotto forma di combustibili fossili e di conseguenza emessi nell'aria circa 0,531 kg di anidride carbonica (fattore di emissione del mix elettrico italiano alla distribuzione). Si può dire quindi che ogni kWh prodotto dal sistema fotovoltaico evita l'emissione di 0,531 kg di anidride carbonica. Questo ragionamento può essere ripetuto per tutte le tipologie di inquinanti.

### ECONOMICI – SOCIALI

Ø diretti per i consumatori come, per esempio, la riduzione della bolletta energetica e il miglioramento del servizio goduto (per esempio offrendo la possibilità di aumentare la temperatura o l'illuminazione degli ambienti o permettendo un aumento della produttività di un motore elettrico senza aumentare i consumi);

Ø e collettivi, quali:

1. la riduzione della dipendenza energetica dall'estero e maggiore sicurezza di approvvigionamento;
2. la riduzione dell'inquinamento derivante dalle attività di produzione e di consumo di energia;
3. un maggior controllo dei picchi di domanda elettrica e possibilità quindi di ridurre il rischio di "blackout" e i costi connessi al verificarsi di squilibri tra consumi e capacità di offerta;
4. un aumento dell'offerta di prodotti e servizi energetici orientati all'efficienza negli usi dell'energia

## La Tecnologia Fotovoltaica

Nel panorama delle fonti rinnovabili il solare fotovoltaico si distingue per la semplicità del sistema di conversione energetica (peraltro, completamente modulare), il basso impatto ambientale e la richiesta di manutenzione molto contenuta. La tecnologia fotovoltaica, infatti, è caratterizzata da un processo di conversione diretta della radiazione solare in energia elettrica, che avviene interamente all'interno della cella solare (o, più in generale, dispositivo fotovoltaico). Un numero limitato di celle (elettricamente collegate tra loro e protette, mediante un apposito "contenitore", dagli agenti meccanici e atmosferici) costituisce il modulo, l'unità elementare di un impianto di produzione, la cui potenza nominale può quindi variare in un intervallo molto esteso (da qualche centinaio di W a decine di MW).

Gli impianti di produzione di energia elettrica da fonte fotovoltaica si distinguono, sia per uso finale dell'energia prodotta (alimentazione di utenze isolate o immissione dell'energia nella rete elettrica), sia per modalità di "raccolta" dell'energia solare che raggiunge il nostro pianeta ("fotovoltaico piano fisso", tipicamente privo di dispositivi ottici preposti alla concentrazione della radiazione incidente, e "fotovoltaico a concentrazione", sempre abbinato ad apparati di movimentazione per "l'inseguimento del sole").

La tecnologia fotovoltaica è relativamente giovane e alquanto costosa; essa risale alla fine degli anni cinquanta nell'ambito dei programmi spaziali, per i quali era necessario disporre di una fonte di energia affidabile e inesauribile, e solo a seguito della prima crisi petrolifera viene impiegata anche nel settore delle applicazioni terrestri. Ciononostante, grazie anche alle sue peculiarità, risolve efficacemente i problemi di elettrificazione delle utenze isolate (tipicamente

quelle lontane dalla rete e quelle nei Paesi in via di sviluppo). Dopo un primo periodo di sperimentazione (mediante la realizzazione e l'esercizio di impianti fotovoltaici con potenze nominali prevalentemente comprese tra le centinaia e le migliaia di kW), si è sempre più affermato l'impiego del fotovoltaico per la generazione distribuita di energia, sia attraverso l'integrazione dei sistemi nel settore residenziale, dei servizi e dell'arredo urbano ("building integration"), sia attraverso l'installazione di piccole centrali fotovoltaiche (da 1 MW tipicamente) installate al suolo.

Al di là di quelle che possono essere le numerose varianti (molte delle quali ancora allo studio o in fase di messa a punto presso i laboratori di ricerca e sviluppo) sui singoli passi di processo per la realizzazione dei diversi tipi di dispositivi fotovoltaici, in termini di produzione commerciale sono oggi di fatto disponibili due tecnologie: la prima, basata sul silicio cristallino (mono- e multicristallino), e la seconda basata sui film sottili (tra i quali il silicio amorfo). I moduli fotovoltaici realizzati con dispositivi al silicio cristallino occupano una percentuale intorno al 96% del mercato mondiale, mentre la restante parte del mercato a film sottile riguarda essenzialmente quelli al silicio amorfo e, parzialmente, quelli basati su celle a film sottile policristallino. La causa di ciò è da ricercarsi, nel caso dei moduli al silicio amorfo, nelle limitate efficienze di conversione della luce solare in energia elettrica (5-7%) e, negli altri casi, nell'effettiva difficoltà di reperire in commercio moduli fotovoltaici differenti da quelli a base di silicio cristallino e di silicio amorfo.

### Ricerca e sviluppo

Il costo d'investimento e la producibilità di un impianto fotovoltaico sono, di fatto, gli unici fattori che determinano il costo dell'energia elettrica prodotta mediante la tecnologia fotovoltaica e sono, a loro volta, fortemente dipendenti dalle caratteristiche del materiale impiegato e dai processi utilizzati nella fabbricazione del dispositivo o, in altri termini, dall'efficienza di conversione e dal costo di produzione del dispositivo stesso. L'attuale efficienza di conversione delle celle commerciali al silicio cristallino è, in genere, compresa tra il 13% e il 18%, mentre per i moduli fotovoltaici al silicio amorfo essa varia tipicamente tra il 5% e il 9% (il valore più elevato riguarda, in generale, i dispositivi multigiunzione); circa i costi, oggi il dispositivo si aggira sui 3,5 €/Wp, mentre il costo dell'investimento dell'intero impianto fotovoltaico chiavi in mano varia tra 5.000 e 7.000 €/kWp.

La ricerca nazionale nel settore fotovoltaico è essenzialmente concentrata, quindi, sulle tecnologie di fabbricazione dei dispositivi e, in misura minore, sui materiali; essa, inoltre, si distingue fortemente per settore di applicazione: mentre per gli usi spaziali l'attenzione prevalente è sull'efficienza di conversione, sul peso, sulle dimensioni e sull'affidabilità della cella (che deve lavorare in condizioni ambientali estreme), per il settore terrestre si punta prioritariamente alla riduzione del costo dell'energia prodotta.

Fra le attività di ricerca per le applicazioni spaziali (la cui descrizione è rinviata ad altra sede), figurano le tecnologie per la realizzazione di dispositivi a multigiunzione ad altissima efficienza (tipicamente InGaP/GaAs/Ge, con efficienze dell'ordine del 35%), i quali possono anche essere utilizzati per applicazioni terrestri negli impianti fotovoltaici a concentrazione.

Per quanto riguarda il fotovoltaico per gli usi terrestri, le attività di ricerca e sviluppo riguardano quattro principali temi: silicio cristallino (nel medio termine), film sottili e i dispositivi a bassissimo costo (nel lungo termine) e, in un futuro meno prossimo, i dispositivi ad altissima efficienza (cioè, prossima al limite termodinamico di conversione della radiazione solare in energia elettrica).

La tecnologia del silicio cristallino, sebbene sia fra tutte quella più matura e la meno promettente al contempo, gode ancora di molta attenzione da parte dei ricercatori, sia perché è, di fatto, la più diffusa, sia perché ancora passibile di una limitata riduzione dei costi di produzione. Più precisamente, si mira, in fabbrica, all'uso di fette di silicio più sottili e di dimensioni maggiori (sopra i 12,5 x 12,5 cm<sup>2</sup>) nonché all'introduzione di processi sperimentati con successo in laboratorio, come la tecnologia a base serigrafica e trattamento superficiale al nitruro di silicio e la tecnica dei contatti sepolti e dell'emitter selettivo; inoltre, una certa

rilevanza è attribuita ai materiali e alle tecnologie per l'incapsulamento del modulo, anch'essi cruciali per abbattere i costi. Parte di queste attività vengono svolte presso l'ENEA, in collaborazione con Eni Tecnologie: esse riguardano l'industrializzazione di processi di laboratorio per celle di grande area (150 cm<sup>2</sup>), a basso costo ed alta efficienza (>17%).

Relativamente ai film sottili, l'attenzione della ricerca fotovoltaica è in massima parte rivolta al silicio amorfo (anche su substrati flessibili): ricerca di base e ricerca industriale sono entrambe coinvolte nello sviluppo di questa tecnologia. In particolare diversi laboratori di ricerca lavorano per migliorare l'efficienza di conversione delle celle solari su piccola area mentre la ricerca industriale punta a effettuare lo scale-up della tecnologia sulla larga area.

Silicio amorfo a parte, sostanziali progressi sono stati registrati nello sviluppo di celle a base di telluriuro di cadmio (CdTe), di diseleniuro di indio e rame (CIS), di diseleniuro di indio rame e gallio (CIGS) e di altri film sottili policristallini, per i quali acquista spesso importanza lo sviluppo di substrati trasparenti flessibili e di film trasparenti conduttori.

I moduli fotovoltaici al CdTe, per esempio, stanno dimostrando una buona stabilità ai vari test di invecchiamento accelerato: un'efficienza del 10,5% è stata raggiunta con moduli da 0,13 m<sup>2</sup> di produzione industriale.

L'interesse per questa tecnologia fotovoltaica è anche italiano: tra gli impegni del Governo sull'attuazione nazionale del Protocollo di Kyoto figura un progetto pilota per la realizzazione di moduli fotovoltaici a film sottile e ad alta efficienza. Il mondo della ricerca fotovoltaica guarda con attenzione anche il silicio microcristallino, un materiale che, rispetto al silicio amorfo, ha caratteristiche strutturali tali da consentire la realizzazione di dispositivi fotovoltaici con un'efficienza stabile più elevata. In questo campo, viene condotta presso ENEA un'attività di ricerca e sviluppo di tecnologie di preparazione dei film sottili per realizzare moduli fotovoltaici di grande area, con buona efficienza stabile (>8%) su substrati economici, anche flessibili (progetto TEFIS del MIUR). Altre attività di ricerca sui film sottili policristallini sono prevalentemente concentrate presso l'Università di Parma per la crescita mediante sputtering, su larga area, di strati di film sottili policristallini per realizzare celle di CuInGaSe<sub>2</sub>/CdS con l'obiettivo di celle d'efficienza superiore al 12% nonché l'ingegnerizzazione del processo di realizzazione di celle solari a base di CdTe/CdS.

Esistono anche approcci ibridi per la realizzazione di celle di silicio cristallino di alta

efficienza, ove la giunzione viene realizzata a bassa temperatura con delle tecniche mutuata dalla tecnologia del film sottile di silicio. Lo sviluppo di moduli fotovoltaici a eterogiunzione di silicio amorfo su silicio cristallino, realizzati mediante processi interamente automatizzati, affidabili e a bassa temperatura, costituisce uno specifico tema sul quale, attraverso collaborazioni nell'ambito di progetti comunitari, è presente anche l'ENEA.

Per quanto riguarda le celle fotovoltaiche a bassissimo costo (inferiore a 1€/Wp, contro i circa 3,5 €/Wp dell'attuale mercato), appaiono molto promettenti i dispositivi fotovoltaici basati sull'uso di materiali organici (polimeri) con tecniche di stampa per la produzione di celle (printed organic solar cell) o altri materiali e quelli ibridi (organici/inorganici), i cui valori di efficienza conversione (attualmente compresa tra il 3% e il 5%) e stabilità nel tempo (stimata non superiore a qualche anno, nelle migliori delle ipotesi) sono in aumento. Indicazioni alquanto attraenti provengono anche dalla tecnologia dell'ossido di rame (Cu<sub>2</sub>O), sulla quale è impegnato anche l'ENEA: la ricerca su queste celle fotovoltaiche non è mai stata particolarmente intensa e l'efficienza massima finora ottenuta è solo dell'1,6%, nonostante dovrebbe essere possibile realizzare dispositivi fotovoltaici con minori problemi di stabilità rispetto alle tecnologie concorrenti (silicio amorfo, celle organiche o dye sensitized), con efficienze superiori al 10% e costo dell'ordine di 0,2 €/Wp.

In un'ottica decisamente più lontana, sono inquadrati le attività esplorative su nuovi materiali e strutture del dispositivo fotovoltaico per l'altissima efficienza, recentemente avviate presso i principali centri di ricerca. Gli approcci e le strade intraprese sono alquanto diversi tra loro e tutti, per il momento, ad elevato rischio: è attualmente in corso, presso l'ENEA, una

valutazione per individuare la strada da percorrere, tenendo anche conto di competenze e infrastrutture di ricerca disponibili presso i laboratori dell'Ente.

Tra le altre attività di ricerca e sviluppo intraprese a livello internazionale, sebbene con un impegno complessivo mediamente più contenuto, figura il fotovoltaico "a concentrazione" che, rispetto al fotovoltaico "piano fisso", presenta vari aspetti da approfondire: la struttura di cella fotovoltaica è più sofisticata (per poter ottenere alti valori di efficienza in presenza di una maggiore radiazione solare incidente), il modulo fotovoltaico che ospita le celle presenta una maggiore complessità, dovuta alla numerosità dei componenti fotovoltaici da assemblare e ai problemi di tenuta e di smaltimento del calore e, infine, l'eliostato, il sistema di supporto dei moduli capace di "puntare" costantemente il sole. Anche in Italia vengono condotte attività in questo specifico settore, sia di ricerca e sviluppo, sia di sperimentazione sul campo e dimostrazione (ENEA, Progetto PhoCUS).

Il mercato mondiale dell'energia solare fotovoltaica continua ad espandersi rapidamente; nel 2004 la produzione di celle fotovoltaiche è passata dagli oltre 700 MWp ai 1.200 MWp circa, con una crescita superiore al 60% in un solo anno

- Produzione di celle fotovoltaiche per area geografica. Anno 2003

Ø Europa	25,8%
Ø Giappone	51,8%
Ø Resto del mondo	10,8%
Ø Stati Uniti	11,6%

Fonte: elaborazioni su dati EurObserv'ER

Leader mondiale nella produzione di celle fotovoltaiche è il Giappone con una quota di oltre il 50% sul totale mondiale: le due maggiori aziende del settore, la Sharp e la Kyocera, sono infatti giapponesi. L'Asia, nel suo complesso, ha una quota di mercato sempre più alta, pari al 58,6% a livello mondiale, con la Cina in crescita. Seguono l'Europa, con il 25,8%, dove leader incontrastata è la Germania, e gli Stati Uniti, con una quota pari al 11,5% .

Leader incontrastata nella produzione di celle fotovoltaiche resta la società giapponese Sharp, con una quota di mercato pari al 25,8% (era del 26,4% nel 2003): nel 2004 sono state prodotte 324 MW di potenza (erano 198 MW nel 2003, con un incremento annuale del 64%).

Le altre aziende leader sono Kyocera con 105 MW (8,3 % delle celle), BP Solar con 85 MW (6,8%) e Mitsubishi Electric con 75 MW (6%), che hanno una produzione complessiva di celle fotovoltaiche pari a 265 MW, ancora inferiore a quella della sola Sharp. La Germania conta più di trenta aziende, che producono oltre il 50% delle celle fotovoltaiche totali realizzate in Europa; l'azienda tedesca più grande è la RWE Solar, che tuttavia detiene il secondo posto dietro la spagnola Isofoton.

La produzione di celle e moduli fotovoltaici è concentrata in poche aziende; nel 2003 l'85% della produzione totale è da attribuire alle prime dieci del settore.

Per quanto riguarda la tecnologia, la quota di produzione di celle al silicio è in crescita e resta la predominante con il 94,2% del totale prodotto.

Il silicio multi-cristallino, con il 56,9% del mercato, risulta essere il più utilizzato rispetto al mono-cristallino, all'amorfo e al film sottile.

Tuttavia, nuova spinta sta avendo il silicio mono-cristallino, che nel 2004 è passato ad una quota di mercato del 36,2% (era del 32,2% nel 2003) a causa della crescente domanda di celle fotovoltaiche a più elevato rendimento. Il Giappone è il maggiore produttore di celle al silicio multicristallino e a film sottile (silicio amorfo e altri materiali); per quanto riguarda le celle al silicio mono-cristallino, invece, il primo posto spetta all'Europa.

Per ciò che concerne gli inverter, invece, sul mercato internazionale sono attualmente presenti più di 296 modelli e taglie diverse. L'inverter non costituisce unicamente una componente che permette la conversione di corrente diretta in corrente alternata compatibile con la rete, ma un dispositivo in grado di monitorare l'intero sistema e la connessione in rete.

Quasi la metà della produzione mondiale di inverter avviene in Europa, con la Germania che da sola produce il 48% del totale. Altri produttori significativi a livello mondiale sono gli USA con il 12% del mercato, il Giappone con il 9% e il Canada con il 7%. In crescita anche in questo settore la produzione dei paesi emergenti del sud-est asiatico (Taiwan 2%).

Per ciò che concerne il valore del mercato fotovoltaico, nella sola Germania, che detiene oltre l'85% del mercato europeo, si stimano nel 2004 circa 20.000 occupati nel settore fotovoltaico, con un fatturato annuo di oltre i 1700 M€.

### Mercato degli impianti fotovoltaici in Italia

In Italia, dopo una fase di grandi investimenti nel fotovoltaico durante gli anni 80 e i primi anni 90, il mercato fotovoltaico ha subito una forte contrazione, in palese controtendenza con i paesi più industrializzati.

Negli ultimi anni, una certa espansione del settore fotovoltaico si è determinata con i nuovi programmi di incentivazione promossi dal Ministero dell'Ambiente e dalle Regioni.

Ad oggi, il mercato del settore fotovoltaico in Italia, che ha raggiunto nel 2003 un valore di circa 38 M€, vede la presenza di diverse tipologie di operatori:

- società nazionali produttrici di componenti e apparecchiature fotovoltaiche (celle, moduli fotovoltaici, inverter, regolatori di tensione, quadri elettrici ecc.);
- distributori di apparecchiature e componenti fotovoltaici prodotti all'estero;
- società dedicate alla sistemistica (progettazione e installazione di impianti fotovoltaici complessi);
- installatori di impianti fotovoltaici.

Secondo recenti studi, nel mercato degli impianti di energia elettrica da fonte solare si registra una maggiore competizione su fattori legati al prezzo e alla qualità delle celle e dei moduli fotovoltaici.

Si verifica, infatti, una pressione concorrenziale molto elevata da parte degli operatori che utilizzano moduli fotovoltaici a basso costo provenienti, per la maggior parte, dai paesi asiatici.

Gli impianti fotovoltaici sono di piccole e medie dimensioni, realizzati anche per utenti privati, per cui non si richiedono grosse capacità di autofinanziamento ed, infine, rilevanti sono anche gli aspetti legati alla progettazione e assistenza; quest'ultimo risulta spesso un fattore critico di successo dal momento che i clienti sembrano premiare gli operatori che danno maggiore supporto postvendita.

### Celle e moduli fotovoltaici prodotti in Italia

In Italia, possono essere individuati due grandi produttori di celle fotovoltaiche: Enitecnologie SpA, che dal 1° gennaio 2004 ha incorporato Eurosolare e Helios Technology.

La produzione, che riguarda sia celle di silicio mono-cristallino che multi-cristallino, ha raggiunto un valore di quasi 8 MW nel 2004 (Tabella 7.4).

Il maggiore produttore di moduli fotovoltaici è Enitecnologie, che ha assorbito Eurosolare, i cui mezzi di produzione hanno una massima capacità produttiva di 9 MWp/anno (12 MW/p entro il 2005).

La produzione comprende sia celle a silicio mono-cristallino che multi-cristallino, nonché specifici moduli fotovoltaici per tetti e facciate, realizzati utilizzando prevalentemente wafer importati dalla Cina.

Enitecnologie ha infatti trasferito ad una joint-venture italo-cinese la tecnologia di produzione di wafer di silicio multi-cristallino.

I wafer al silicio monocristallino, invece, sono reperiti sul mercato internazionale.

Helios Technology ha, invece, una massima capacità produttiva di 3 MWp/anno per 2 turni, e produce celle e moduli, di potenza variabile tra i 20 Wp e 80 Wp, esclusivamente da silicio mono-cristallino, da wafer acquistati sul mercato internazionale.

Oltre alle due aziende citate sono presenti in Italia numerose società, specializzate nella realizzazione di moduli fotovoltaici ottenuti per incapsulamento di celle mediante appositi laminatoi; si stima che la produzione di questi moduli, destinati prevalentemente all'esportazione, in particolare in Germania, si sia attestata nel 2004 intorno a 15 MW.

In generale, la maturazione della tecnologia fotovoltaica ha portato ad una diminuzione dei costi dei moduli di circa 10 volte e al raddoppio del rendimento di sistema in 20 anni. Il prezzo medio del modulo è leggermente diminuito nel corso del 2004, raggiungendo un valore di 3,0 €/W per ordini di volume ragionevoli; viceversa, al dettaglio i prezzi raggiungono un valore di circa 3,8 €/W.

### Balance of System

Si annoverano tra i produttori di altri componenti e sistemi oltre 15 produttori di inverter, connettori e regolatori di carica per uso fotovoltaico. Per ciò che concerne gli inverter il prezzo medio per kVA risulta variabile in funzione di impianti collegati alla rete o meno; si riportano di seguito i prezzi medi per kVA per impianti collegati alla rete.

Sono state individuate, inoltre, società produttrici di batterie con una specifica esperienza nel settore fotovoltaico. Le batterie per uso fotovoltaico devono infatti possedere le seguenti caratteristiche: basso valore di autoscarica, lunga vita stimata, manutenzione quasi nulla, elevato numero di cicli di carica e scarica. Il prezzo pagato per tali componenti varia notevolmente in funzione del volume di vendita e di numerose altre variabili impiantistiche.

A questi produttori si aggiungono, come detto, numerosi distributori di moduli fotovoltaici e componenti prodotti all'estero, e rivenditori che progettano e realizzano gli impianti offrendoli sul mercato nella formula "impianto chiavi in mano". Sono presenti, infine, imprese di servizi, tra i quali installatori e coloro che si occupano della manutenzione dell'impianto.

### Prospettive del Fotovoltaico in Italia

Il fotovoltaico appare tra le più promettenti tecnologie "rinnovabili" in grado di produrre energia elettrica su grande scala, soprattutto in Italia dove i livelli di insolazione sono elevati. Il Piano Energetico Nazionale (PEN) del 1988, nell'intento di diversificare le fonti di produzione e di ridurre la percentuale di energia importata, attribuiva al fotovoltaico un ruolo rilevante nell'ambito delle fonti rinnovabili definendo diverse azioni per il suo sviluppo.

Al fine di incoraggiare ed accelerare la diffusione del fotovoltaico (e delle altre fonti di energia rinnovabile) è in vigore, e potenzialmente operante, in Italia, un sistema di regolamenti e sussidi. La legge 9 del 1991, consente agli investitori privati di produrre energia da fonti rinnovabili e di immetterla nella rete elettrica nazionale. L'ENEL deve acquistare questa energia ad un prezzo fisso imposto dal Comitato interministeriale prezzi (CIP).

Gli esperti concordano sul fatto che la sorte "finale" del fotovoltaico (e in generale delle energie rinnovabili) si giocherà su tempi lunghi in tutto il mondo (ma particolarmente nei paesi sviluppati che sono i più energivori) su uno scacchiere che dovrà considerare anche la necessità di salvaguardia dell'ambiente insieme al progressivo impoverimento delle risorse di combustibili fossili.

Dal punto di vista della tecnologia, è opinione diffusa che nei prossimi anni, a livello di produzione industriale, continuerà a regnare la tecnologia del silicio cristallino. Pertanto gli sforzi di ricerca e sviluppo su di essa continuano al fine di facilitare la sempre maggiore diffusione del fotovoltaico consentendo allo stesso tempo la redditività delle industrie. Un contributo essenziale al raggiungimento della economicità dell'energia da fotovoltaico deve essere dato dalle azioni sui componenti non fotovoltaici del sistema (il cosiddetto BOS - Balance of system). In questo settore è indispensabile il contributo delle società elettriche.