

MANUALE DEL FOTOVOLTAICO

Indice

1. Guida al fotovoltaico.....	2
1.1 Energia solare ed energia fotovoltaica.....	2
1.2 L'impianto fotovoltaico.....	3
1.3 Quanto produce un impianto fotovoltaico.....	6
1.4 Costi e ricavi di un impianto – gli incentivi.....	7
1.5 Classificazioni degli impianti fotovoltaici.....	10
1.6 Vendita e Scambio sul posto dell'energia.....	12
2. Appendice: Tecnologia del fotovoltaico	13
2.1 La radiazione solare.....	13
2.2 Conversione dell'energia solare, effetto fotovoltaico.....	17
2.3 La cella fotovoltaica: caratteristiche elettriche.....	23
2.3.1 <i>Efficienza della cella fotovoltaica.</i>	30
2.4 Modulo fotovoltaico.....	35
2.5 Tipologie di sistemi fotovoltaici.....	39
2.5.1 <i>Sistemi isolati e sistemi connessi in rete.</i>	40
2.5.2 <i>Sistemi ad inclinazione fissa.</i>	42
2.5.3 <i>Sistemi ad inseguimento attivo.</i>	43
2.5.4 <i>Sistemi ad inseguimento passivo.</i>	44

1. Guida al fotovoltaico

1.1 Energia solare ed energia fotovoltaica.

Quando si parla di fonti “rinnovabili”, pensiamo subito al sole. Il sole è un “combustibile” gratuito, inesauribile, distribuito, assolutamente non inquinante. L’energia solare può essere sfruttata in due maniere e con due tipi di pannelli diversi:

- come energia termica per la produzione di acqua calda (sanitaria o per riscaldamento), tramite i pannelli solari termici
- per la produzione di energia elettrica, tramite i pannelli fotovoltaici.



Nei pannelli fotovoltaici avviene la conversione della luce in energia elettrica: la parola fotovoltaico deriva infatti dalla parola greca “photon” cioè luce e “Volt” che è l’unità di misura della tensione elettrica, oltre che il nome di uno dei primi studiosi dei fenomeni elettrici.

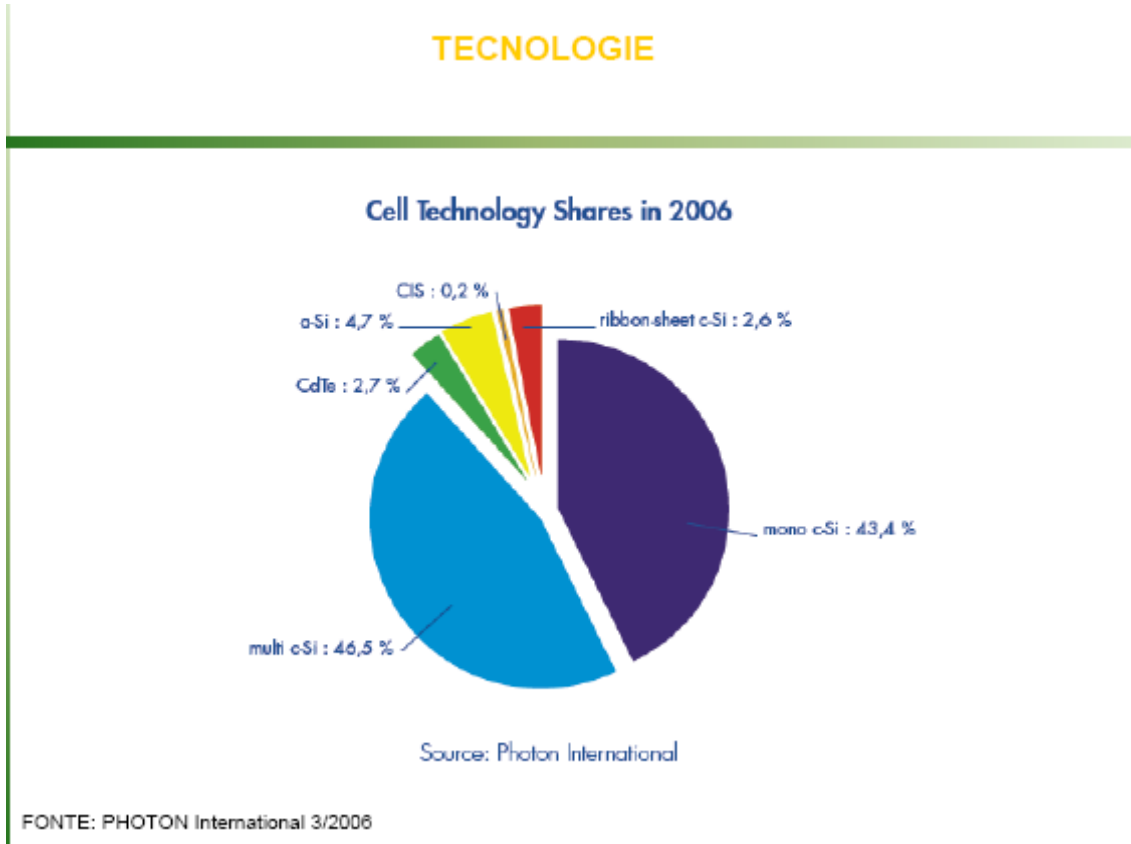
I pannelli, detti anche “moduli“, fotovoltaici sono costituiti da molte “celle” normalmente di silicio. Questo è un materiale presente in natura in grande quantità, ma deve essere estratto e trattato per farlo diventare un elemento semiconduttore (analogo a quello utilizzato nei componenti elettronici, come i PC, televisori etc) che possa dare l’effetto fotovoltaico.

Il silicio delle celle è di tre tipi:

- mono-cristallino (*mono-cSI*), che ha una resa energetica dal 14 al 18%
- poli-cristallino (*poli-cSI*), che ha una resa energetica del 13-14%
- amorfo (*a-SI*), che ha una resa energetica dal 6-7%

Oltre al silicio, sono utilizzati altri materiali con la tecnologia del film sottile (Telluro di Cadmio *Cd-Te* ecc.) così come riportato nella figura seguente.

TECNOLOGIE



Un modulo fotovoltaico è di norma rettangolare, può tipicamente presentare una superficie attorno a $1,5 \text{ m}^2$ ed erogare una potenza elettrica di picco attorno a 200 Watt alla tensione di alcune decine di Volt. Molti moduli sono collegati tra loro in serie ed in parallelo per dare la potenza e tensione desiderate.

1.2 L'impianto fotovoltaico.

Un impianto fotovoltaico si può realizzare in aree non altrimenti utilizzate, come tetti, pensiline o terreni incolti, purchè bene esposte al sole e prive di ombra. La potenza di un impianto è data da quella di ciascun modulo moltiplicato il numero di moduli, e si misura in kWp (kW di picco): cosa vuol dire esattamente? Poiché il sole “si muove” apparentemente da Est a Ovest durante il giorno ed ha uno zenith che varia nel corso dell'anno, l'irraggiamento

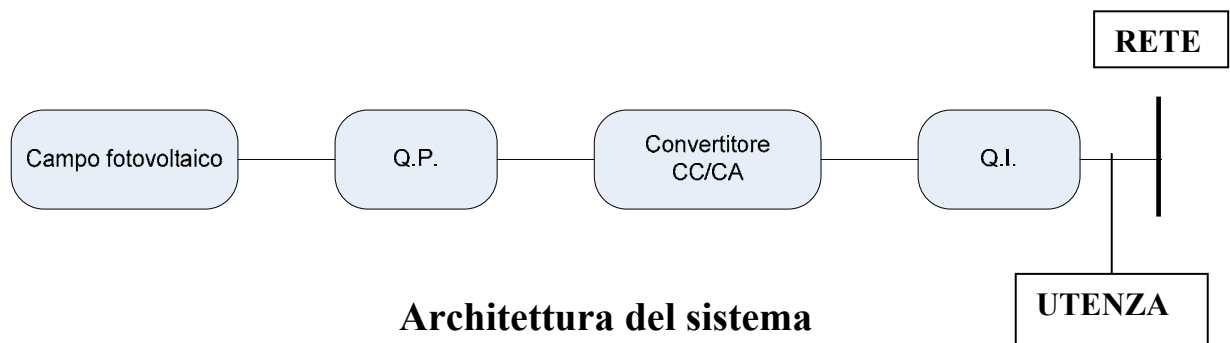
solare incidente su ciascun modulo varia nel corso del giorno e dell'anno, e di pari passo varia la potenza elettrica da esso erogata; perciò questa si avvicinerà al valore di picco, che è quello massimo garantito dal costruttore per un modulo, solo a mezzogiorno di alcune giornate fresche d'estate. Nell'arco di un intero anno, si avrà la massima captazione di irraggiamento solare se i moduli sono disposti

- con orientamento a Sud
- con inclinazione, alle nostre latitudini, di 30°;

sono accettate variazioni contenute, per es. fino a 35° Sud-Est o Sud-Ovest e 15-20° di inclinazione.

Un'alternativa, normalmente per gli impianti di grossa taglia, è di avere dei sistemi a "inseguimento" del sole, che cioè dei supporti motorizzati che ruotano continuamente i pannelli per orientarli verso il sole.

I pannelli, che nel loro insieme costituiscono il "campo fotovoltaico", producono energia elettrica in corrente continua; per poter essere utilizzata, questa deve essere convogliata su uno o più inverter, che sono convertitori da corrente continua ad alternata; di qui l'energia prodotta alimenta l'utenza oppure, nei momenti di esubero, è immessa in rete.



I pannelli e i loro supporti, gli inverter, i cavi e le protezioni elettriche prescritte presenti nei quadri Q.P. (Quadro di parallelo stringhe in CC) e Q.I. (Quadro di interfaccia in CA) costituiscono nel loro insieme un impianto fotovoltaico.

I vantaggi di un impianto fotovoltaico, rispetto ad altri sistemi di generazione di energia elettrica, sono:



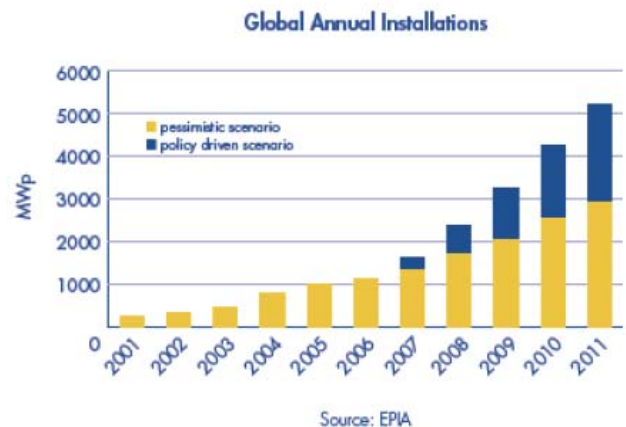
- diminuzione della quota di energia nazionale prodotta nelle centrali a combustibile fossile (carbone, nafta da petrolio, gas metano), con conseguente diminuzione di emissione di CO₂, gas responsabile dell'effetto serra;
- diminuzione della dipendenza dall'estero per l'approvvigionamento di questi combustibili;
- estrema affidabilità per l'assenza di parti in movimento
- minimo costo di manutenzione

Gli svantaggi consistono:

- nella elevata superficie necessaria per avere una potenza elettrica (circa 7,5 m² di pannelli danno 1 kWp, il che vuol dire che un tetto piano, come si vedrà, potrà fornire 1kWp ogni 15-20 m²;
- nella variabilità della fonte energetica, che è il sole.

Per ovviare alla variabilità dell'energia solare rispetto all'energia che serve, si ricorre alla stessa rete elettrica come sistema di accumulo dell'energia: infatti, la connessione dell'impianto alla rete permette che nei momenti di carenza o assenza di energia solare (per esempio la sera) l'energia elettrica venga dalla rete, e viceversa nei momenti di esubero (per es. il week-end per un'utenza di uffici) l'energia prodotta è immessa in rete.

Le installazioni di impianti fotovoltaici, spinti come si vedrà anche da incentivi che i vari Stati assegnano con la finalità di raggiungere gli obiettivi di Kyoto in tema di riduzione dei gas-serra, hanno avuto ed avranno un'espansione esponenziale nel mondo: vedi figura affianco.



1.3 Quanto produce un impianto fotovoltaico.

Un impianto fotovoltaico produce un quantitativo annuo di energia elettrica che dipende

- dal tipo e quindi dalla resa dei moduli,
- dalla radiazione solare del luogo,
- dalla disposizione dei moduli,
- da eventuali ombre
- dal rendimento complessivo degli componenti dell'impianto (inverter, cavi elettrici, quadri).

Ogni modulo in commercio è contraddistinto una potenza di picco, che è la potenza prodotta nelle condizioni standard (STC) di insolazione e temperatura (rispettivamente 1000 W/m² e 25°C); per svincolarsi dal modulo che si sceglierà e dalla potenza dell'impianto, si suole far riferimento alla producibilità annua, che è misurata in kWh/kWp ed è data dalla radiazione solare incidente x il rendimento complessivo, che statisticamente vale 75-80 %.

La radiazione incidente sui moduli, inoltre, è massima come si è visto se l'orientamento rispetto a Sud (azimuth) e l'inclinazione (tilt) dei pannelli è ottimale, altrimenti ci saranno delle perdite rispetto al valore massimo.

A titolo di esempio, si fornisce la tabella della producibilità annua misurata in kWh/kWp per il comune di Caserta, per un impianto ben realizzato.

Caserta		
Azimuth fisso = 0°		
Tilt	Producibilità annua [kWh/kWp]	Perdite rispetto a 30° [%]
30°	1418	
25°	1410	0,56
20°	1395	1,62
15°	1372	3,24
10°	1341	5,43
5°	1303	8,11
0°	1259	11,21

Tilt fisso = 30°			Tilt fisso = 20°		
Azimuth	Producibilità annua [kWh/kWp]	Perdite rispetto a 0° [%]	Azimuth	Producibilità annua [kWh/kWp]	Perdite rispetto a 0° [%]
0°	1418		0°	1395	
10°	1416	0,14	10°	1393	0,14
20°	1409	0,63	20°	1387	0,57
30°	1399	1,34	30°	1378	1,22
40°	1383	2,47	40°	1365	2,15
50°	1361	4,02	50°	1348	3,37

I moduli sono garantiti per 20 anni almeno all'80% della potenza iniziale; in pratica questo decadimento si raggiunge dopo almeno 25 anni, ma la vita di un impianto si può tranquillamente stimare da 30 a 50 anni. A causa del decadimento della potenza, la produzione annua scenderà, specie dopo i primi anni, dello 0,7-1% all'anno.

1.4 Costi e ricavi di un impianto – gli incentivi.

Il costo “chiavi in mano per un’installazione standard può variare da 6500 a 7500 Euro/kWp (IVA 10% esclusa), che per circa il 60% è costituito dal costo dei pannelli.

Il fattore costo, che sembra essere uno degli svantaggi di un sistema fotovoltaico, diventa invece un punto di forza grazie agli incentivi derivanti dal “Conto Energia”, istituito con D.M. delk 19/2/2007.

Bisogna tener conto che in base a tale D.M. lo Stato incentiva il fotovoltaico NON con finanziamenti iniziali dello Stato né con detrazioni fiscali, ma con un sistema in definitiva più corretto ed efficiente anche per l’utente, cioè con gli incentivi erogati a fronte dell’energia prodotta. Gli incentivi sono erogati dal GSE, Gestore dei Servizi elettrici, in base alle tariffe stabilite dal D.M. Come si vede nella tabella appresso riportata, queste privilegiano gli impianti piccoli, per sopperire ai maggiori costi fissi, e l’integrazione architettonica, in definitiva l’estetica della realizzazione.



INCENTIVO CONTO ENERGIA D.M. 19/2/2007 (€/kWh)	1	2	3
Taglia di potenza dell'impianto	Non integrato	Parzialmente integrato	Integrato
$1 \text{ kW} \leq P \leq 3 \text{ kW}$	0,40	0,44	0,49
$3 \text{ kW} < P \leq 20 \text{ kW}$	0,38	0,42	0,46
$P > 20 \text{ kW}$	0,36	0,40	0,44

1 Queste tariffe si applicano in caso di installazioni a terra. Si applicano anche agli impianti costituiti da inseguitori solari posizionati a terra e agli impianti su edifici in assenza di parziale o totale integrazione architettonica (colonne 2 e 3 della tabella).

2 La tariffa relativa alla "parziale integrazione architettonica" viene riconosciuta se rispettate alcune condizioni fissate per l'inserimento dei moduli fotovoltaici su un edificio. Rientrano ad esempio in questa tipologia le installazioni su tetto a falda purché i moduli siano paralleli alla falda, o in generale su terrazzo piano con i moduli nascosti dalla eventuale balaustra del terrazzo (balaustra almeno metà dell'altezza verticale pannelli).

3 La tariffa relativa alla "integrazione architettonica" viene riconosciuta agli impianti fotovoltaici i cui moduli sostituiscono materiali di rivestimento di edifici e fabbricati. Rientrano ad esempio in questa tipologia le installazioni su tetto purché i moduli sostituiscano le tegole del tetto, su pensiline, pergole, tettoie in cui la struttura della copertura sia costituita dai moduli fotovoltaici.

Tariffe maggiorate del 5%	1	2	3
Taglia di potenza dell'impianto	Non integrato	Parzialmente integrato	Integrato
$1 \text{ kW} \leq P \leq 3 \text{ kW}$	0,42	0,46	0,51
$3 \text{ kW} < P \leq 20 \text{ kW}$	0,40	0,44	0,48
$P > 20 \text{ kW}$	0,38	0,42	0,46

Hanno diritto ad una maggiorazione della tariffa del 5%:

- impianti con potenza superiore a 3kW, appartenenti alla tipologia "Nessuna integrazione architettonica" che consumano almeno il 70% energia prodotta;
- impianti i cui moduli fotovoltaici, in fase di realizzazione, sono serviti per sostituire pannelli di Eternit;
- impianti appartenenti a soggetti pubblici in un comune con meno di 5000 abitanti.

I titolari di impianti installati a servizio di edifici o unità immobiliari in regime di Net Metering hanno diritto ad una maggiorazione della tariffa fino al 30% se dopo l'installazione dell'impianto FV eseguono interventi di Efficienza Energetica producendo una Certificazione che dimostri la riduzione dei consumi (elettrici e termici).

Dato che gli incentivi sono erogati dal GSE solo quando l'impianto è completato e produce, il primo e fondamentale passo per realizzare un impianto fotovoltaico è avere da una banca un finanziamento dell'investimento che si fa per l'acquisto; una buona Società che offre impianti "chiavi in mano", come la 3E Environment Energy, si preoccuperà di far ottenere il finanziamento anche senza particolari garanzie, ad esempio con la formula del Leasing a lunga durata, ed alle migliori condizioni di mercato.

Poi, se l'impianto è stato progettato e realizzato correttamente ed ha una buona produzione, gli incentivi erogati dal GSE ripagheranno in toto la rata del finanziamento, e rimarranno per l'utente dell'impianto due ricavi:

- l'eventuale vendita dell'energia eccedente ed immessa in rete.
- il risparmio dell'energia fotovoltaica auto-consumata e che perciò non sarà più conteggiata in bolletta (la tariffa di acquisto è superiore a quella di vendita dell'energia, e perciò l'auto-consumo consente sempre un risparmio).

Gli incentivi sono erogati in base a tutta l'energia prodotta, non solo a quella venduta alla Società elettrica, e per questa ragione andranno installati due contatori, uno immediatamente a valle dell'impianto fotovoltaico ed un altro, bi-direzionale, nel punto di consegna dell'energia alla Società elettrica.

Gli incentivi in conto energia non si possono cumulare con eventuali altri incentivi ottenuti da particolari soggetti, come incentivi in conto capitale superiori al 20% eventualmente erogati da Regioni o Province e con "Certificati verdi" per produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

I costi di esercizio si riducono a quelli di

- Assicurazione
- Manutenzione, che consiste, salvo eventi eccezionali, nel controllo dell'impianto anche a distanza e nella pulizia pluri-mensile
- Canone annuo per l'installazione e lettura dei sistemi di misura
- Gestione del contratto di vendita (necessaria oltre i 20 kWp)

Se tutti i servizi sono pre-ordinati ed inseriti in un chiaro "business plan", come è nello standard di una Società come la 3E Environment Energy, il bilancio tra i ricavi sopra detti e dei costi di esercizio permetterà di avere utili interessanti già dal secondo anno.



1.5 Classificazioni degli impianti fotovoltaici.

La prima grande distinzione è tra impianti connessi in rete ad isola. Il secondo tipo si realizza solo nei posti in cui non c'è la rete elettrica, ed ovviamente richiede la presenza di accumulatori. Gli impianti connessi in rete, invece, non ne hanno bisogno, sono ni soli ad usufruire degli incentivi del GSE, e sono quelli più utilizzati.

Gli impianti connessi in rete si possono dividere in tre fasce principali:

- Piccoli impianti: ***fino a 20 kWp***.
Possono essere collegati in bassa tensione quindi con bassi costi, possono usufruire della vantaggiosa formula dello scambio sul posto o “net metering” (vedi appresso), e usufruiscono di incentivi maggiori. L'utenza tipo è quella domestica o piccole aziende.
- Impianti medi: ***da 20 a 50 kWp***.
Possono essere collegati ancora in bassa tensione (380 V), e normalmente hanno un iter autorizzativo ancora semplice (oltre alla D.I.A. al Comune come per ogni manutenzione straordinaria vanno espletate le pratiche per l'officina elettrica).
- Grandi impianti o centrali: ***oltre 50 kWp***.
E' richiesto il collegamento in media tensione (normalmente 20 kV) con maggiori costi di connessione alla rete e per il trasformatore da bassa a media tensione se non già presente, l'iter autorizzativo è più complesso in quasi tutte le Regioni.

Dal punto di vista funzionale, le installazioni tipo si fanno:

- ***Su tetto piano***, quale la terrazza di copertura di un edificio. I pannelli sono disposti in file su supporti metallici triangolari per dar loro una inclinazione di 30°. Le varie file sono orientate preferibilmente a Sud, e sono collocate ad una distanza l'una dall'altra tale che non ci sia auto-ombreggiamento di una fila su quella posta dietro. Normalmente sono considerati “parzialmente integrati”.





- ***Su tetto a falde.*** I pannelli sono fissati sulla falda del tetto esposta prevalentemente a Sud, o addirittura sostituiscono almeno in parte delle tegole, per poter essere riconosciuti come “totalmente integrati architettonicamente” ed avere la massima tariffa incentivante.

- ***Sul tetto di un capannone industriale.*** Poiché tali coperture sono di vario tipo, particolare cura deve avere la progettazione nello scegliere la sistemazione ed il tipo di pannelli più idonei. Interessante è la copertura a shed, normalmente inclinati di 20-30° e già rivolti a Sud per permettere al lucernaio posteriore di avere la luce da Nord per l’illuminazione diurna.



- ***Come tettoia di un parcheggio,*** di una pensilina qualsiasi, di un pergolato: in tal caso generalmente i pannelli fotovoltaici hanno essi stessi la funzione di copertura, e l’impianto è totalmente integrato.



- ***Impianto a terra.*** I pannelli sono disposti come descritto per il tetto piano, oppure con sistemi ad inseguimento del sole, ad un’altezza dal suolo tale da permettere per esempio il pascolo. Si tratta di impianti normalmente molto grandi, fino a qualche MW, e sono considerati “non integrati”.

1.6 Vendita e Scambio sul posto dell'energia.

Gli impianti fotovoltaici possono essere connessi alla rete dell'Enel, o in generale del distributore locale, con tre modalità:

- **Vendita totale.**

L'energia dell'impianto fotovoltaico è solo venduta e non auto-consumata, come per es. agli impianti a terra fatti in luoghi distanti da utenze.

- **Vendita parziale.**

L'energia dell'impianto fotovoltaico è in parte auto-consumata ed in parte venduta; essendoci un'utenza, l'energia elettrica è immessa in rete o prelevata dalla stessa a seconda dell'ora (giorno o notte, per esempio), e la Società elettrica tramite un contatore bi-direzionale (o due contatori distinti) contabilizza separatamente l'energia venduta dal titolare dell'impianto e quella fornitagli.

- **Scambio sul posto** (Net metering).

Lo scambio sul posto, possibile solo fino a 20 kW, realizza dal punto di vista elettrico lo stesso concetto del punto precedente, ma dal punto di vista commerciale la Società elettrica solo a fine anno fa un conguaglio tra energia prelevata e ceduta. Se però l'energia ceduta è superiore a quella prelevata, la differenza non può essere venduta alla Società elettrica, ma viene portata a credito al massimo per tre anni.

Risulta evidente che, se i consumi annuali sono superiori o almeno fino all'80-90% della produzione da fotovoltaico, lo scambio sul posto conviene perché si sfruttano al massimo i benefici economici dell'auto-consumo (vedi par. precedente). Inoltre, la procedura per ottenere la connessione è più semplice e meno costosa.

2. Appendice: Tecnologia del fotovoltaico

2.1 La radiazione solare

L'energia solare è emessa dal sole sotto forma di un flusso continuo di fotoni; essa è generata da processi di fusione nucleare, in cui due nuclei d'idrogeno (basso numero atomico) si uniscono e formano un atomo d'elio (numero atomico superiore). Questa fusione libera enormi quantità di energia, in quanto la massa del nucleo risultante è minore della somma delle masse dei nuclei iniziali; tale differenza di massa è convertita in energia secondo la nota relazione:

$$E = mc^2$$

L'energia irradiata dal Sole si propaga con simmetria sferica nello spazio, raggiungendo la fascia esterna dell'atmosfera terrestre con un valore, per unità di superficie e di tempo, pari a 1353 W/m^2 (costante solare).

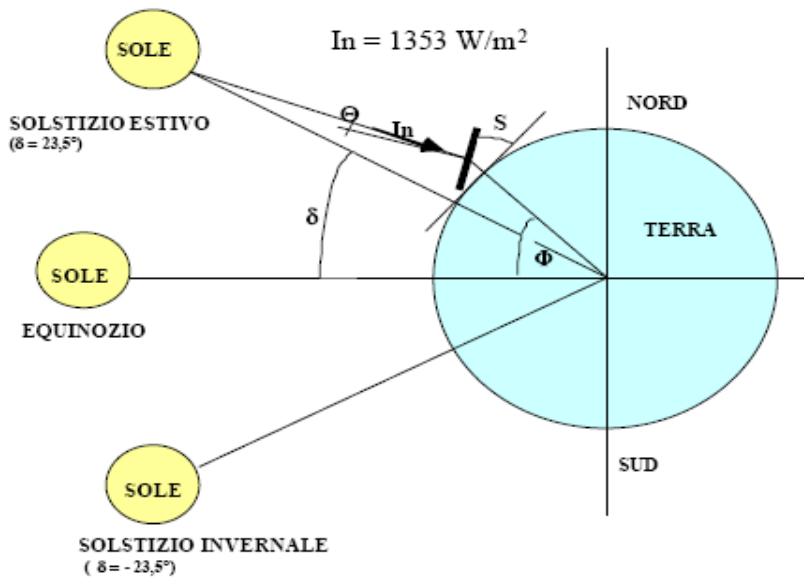


Fig.2.1

L'energia incidente sulla superficie dei moduli fotovoltaici dipende dalla costante solare e dall'angolo che i raggi del sole formano con la superficie dei moduli; tale angolo, funzione oltre che

della posizione del pannello anche del tempo, può essere determinato analiticamente. Fuori dell'atmosfera, pertanto, è possibile calcolare, istante per istante, sia il valore dell'irraggiamento sui moduli che l'insolazione, cioè l'energia incidente sui moduli in un determinato periodo di tempo:

LA RADIAZIONE SOLARE FUORI DELL'ATMOSFERA è pari a

$$I = I_n \cos \Theta$$

- $I_n = 1353 \text{ W/m}^2$ (intensità della radiazione su superficie piana perpendicolare ai raggi del sole)
- $\Theta = f(\Phi, S, \gamma, \omega, \delta)$ (angolo tra la normale alla superficie e i raggi del sole)
- Φ = latitudine
- S = angolo di tilt
- γ = azimut
- ω = angolo orario = $15 (12 - t)$
- t = ora solare
- δ = declinazione solare = $23.5 \sin [360 (284 + N) / 365]$
- N = giorno dell'anno

L'INSOLAZIONE GIORNALIERA vale:

$$Q = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I \, d\tau = I_n \, f(\Phi, S, \gamma, \delta)$$

con ω_0 = angolo orario per cui $I = 0$.

Il valore massimo dell'energia incidente sui moduli, inoltre, si ottiene per angolo di azimut nullo e angolo di tilt pari alla latitudine del sito :

ANGOLO OTTIMALE DI TILT = LATITUDINE

$dQ/dS = 0$ per $\gamma = 0$

valore medio annuale di $\delta = 0$

Attraversando l'atmosfera, la radiazione solare si riduce a circa 1 kW/m^2 sulla superficie terrestre, in condizioni ottimali di cielo limpido e sole allo zenit, in quanto subisce diverse dispersioni; in particolare l'energia che raggiunge la superficie della Terra varia con il variare della latitudine, dell'altezza dal suolo, dell'ora del giorno e della stagione. Essa, inoltre, può mutare repentinamente in seguito a brusche variazioni meteorologiche locali.



Durante l'attraversamento dell'atmosfera terrestre, l'irraggiamento solare subisce effetti diversi:

- una sua parte è riflessa verso lo spazio, per opera delle nubi.
- una parte, quella diffusa, è riflessa in tutte le direzioni, quando incontra le molecole d'azoto, ossigeno, vapor d'acqua, anidride carbonica, ozono.
- una quota è assorbita dalle molecole dell'atmosfera che, scaldandosi emettono radiazione infrarossa.
- infine una parte raggiunge la superficie della Terra e prende il nome di radiazione diretta.

La componente diffusa è molto importante poiché, in inverno, è in percentuale molto maggiore di quella diretta e, su base annua, è pari al 55% di quella globale; i pannelli solari, inoltre, funzionano anche in presenza della sola componente diffusa; generano, infatti, elettricità anche con cielo nuvoloso, sebbene la loro produzione diminuisca proporzionalmente all'intensità luminosa. Tutti questi fenomeni, che portano quindi ad una diminuzione della potenza e dello spettro, sono causati dall'azione assorbente e filtrante dello strato d'atmosfera che l'irraggiamento deve attraversare per giungere a terra. Si comprende, pertanto, che più sarà lungo il percorso dell'irraggiamento nell'atmosfera, più esso sarà attenuato.

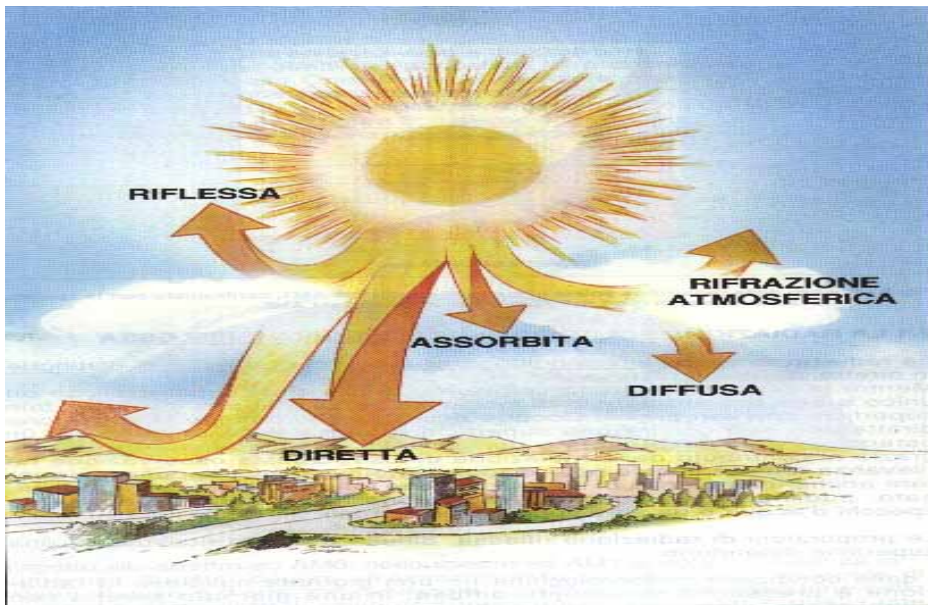


Fig. 2.2 Componenti della radiazione solare

Sulla superficie terrestre arrivano ,come illustrato in fig. 2.2, una componente diretta della luce ed una componente diffusa; mentre la componente diretta arriva sulla superficie con un angolo pari circa a quello della latitudine del luogo, quella diffusa non possiede angoli di arrivo preferenziali.

Come già detto, in funzione dell'inclinazione del sole sull'orizzonte, la radiazione totale raggiunge mediamente un valore massimo pari a circa 1.000 W/m^2 (irraggiamento al suolo, in condizioni di giornata serena e sole a mezzogiorno); questo valore è tuttavia fortemente influenzato dalle variazioni delle condizioni atmosferiche di carattere aleatorio e, per questo motivo, il progetto degli impianti fotovoltaici va eseguito utilizzando i dati storici di soleggiamento rilevati nella località prescelta o in località con caratteristiche climatiche simili. I dati storici disponibili riguardano generalmente i valori giornalieri o medi mensili dell'insolazione su superficie orizzontale (espressi in $\text{kWh/m}^2/\text{giorno}$).

Per meglio comprendere quanto detto riportiamo una mappa isoradiativa dell'Italia, relativa al soleggiamento medio annuo su superficie orizzontale espresso in $\text{kWh/m}^2/\text{giorno}$.(Fig. 2.3)

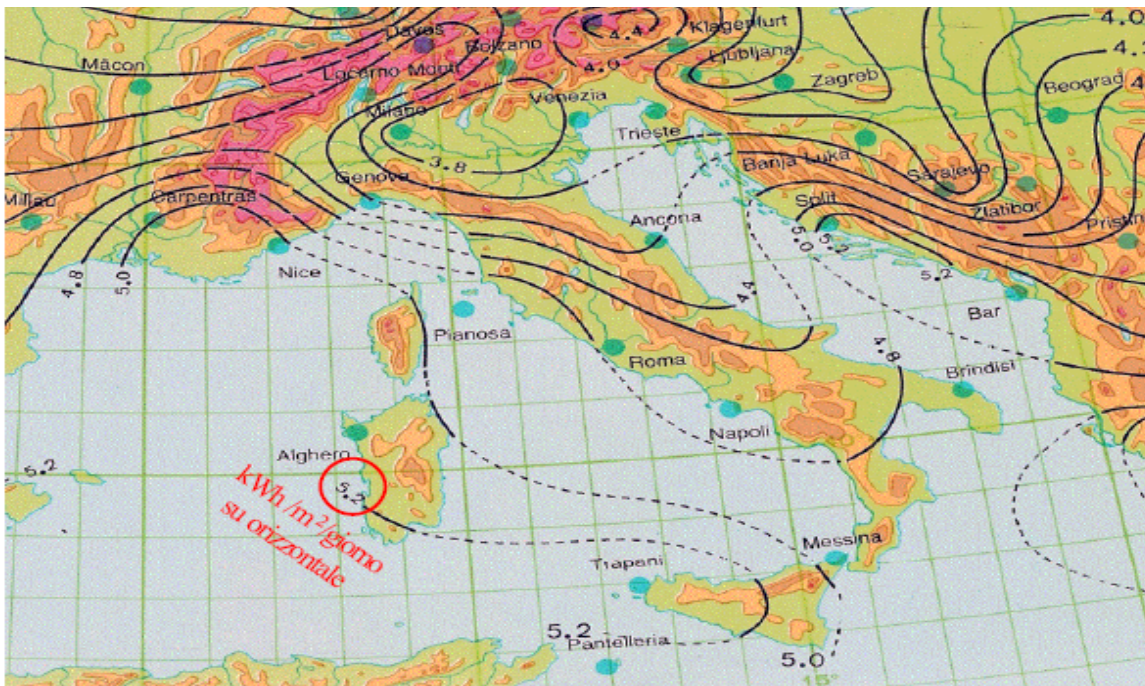


Fig. 2.3 Curve isoradiative

Per il calcolo dell'angolo d'inclinazione dei pannelli bisogna, pertanto, tener conto dei dati disponibili sulla RADIAZIONE SOLARE AL SUOLO, ricavabili come già detto dai dati storici del sito, e valutarli in base alla stagionalità del carico ed alla latitudine.

L'orientamento dei moduli solari è fondamentale e la loro posizione ideale è un orientamento esattamente verso Sud. Per un posizionamento fisso di validità annuale è consigliabile un'inclinazione pari alla latitudine meno 10° ; dunque, alle nostre latitudini, l'inclinazione ottimale del piano dei moduli è pari a circa 33° (in questo modo si massimizza l'energia captata nell'arco dell'anno). Per gli impianti indirizzati solo per la stagione estiva si adottano dei valori di inclinazione pari alla latitudine meno 20° - 30° , per il periodo invernale le inclinazioni devono essere pari alla latitudine più 10° - 15° . Questi angoli possono cambiare da località a località, sebbene ci si trovi alla stessa latitudine, a causa della variabilità della componente diretta e diffusa, che si ha nelle diverse zone.

2.2 Conversione dell'energia solare, effetto fotovoltaico.

La tecnologia fotovoltaica nacque alla fine degli anni cinquanta nell'ambito dei programmi spaziali, per i quali era necessario disporre di una fonte di energia affidabile ed inesauribile. L'intera tecnologia si basa sulla capacità di alcuni materiali semiconduttori, opportunamente trattati, di convertire l'energia della radiazione solare in energia elettrica. Il materiale più diffuso è, indubbiamente, il silicio, utilizzato in diverse forme, che si differenziano per costi e resa energetica.

In particolare:

- **silicio monocristallino**, caratterizzato da un alto costo di produzione ma rendimento energetico elevato, compreso tra il 15% ed il 17%;
- **silicio policristallino**, disponibile a costi inferiori, ma caratterizzato da rendimenti compresi tra il 12% ed il 14%;
- **silicio amorfo**, disponibile a basso costo ma con rendimenti energetici inferiori al 10%.

Il silicio monocristallino è comunque il più usato in quanto, oltre ad avere il migliore rendimento energetico, possiede anche caratteristiche di durata superiori a qualsiasi altro materiale usato per lo stesso scopo.

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

L'atomo di silicio possiede 14 elettroni, quattro dei quali occupano l'orbita più esterna che, risulterebbe "piena", se contenesse otto elettroni. Questi elettroni sono detti elettroni di valenza e possono partecipare alle interazioni con gli altri atomi. Nella struttura cristallina l'orbita esterna viene riempita con l'aiuto di altri quattro elettroni, che ogni atomo ha in comproprietà con gli atomi adiacenti.(Fig. 2.4)

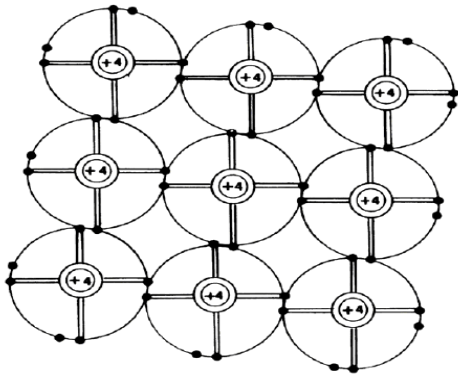


Fig. 2.4 Struttura cristallina del silicio

Esiste quindi fra un elettrone ed i due atomi, che esso contribuisce a tenere uniti, un forte legame elettrostatico che può essere spezzato con una quantità d'energia tale da permettere ad un elettrone di passare ad un livello energetico superiore, in pratica dalla banda di valenza alla banda di conduzione, superando la banda proibita, E_g (energy gap). L'energia necessaria per effettuare questo salto può essere fornita agli elettroni o mediante eccitazione termica o mediante assorbimento di fotoni di opportuna energia. Per l'atomo di silicio quest'energia è pari ad $E_g = 1.08 \text{ eV}$ ($1\text{eV}=1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$).

Fornito tale valore d'energia, l'atomo passa al livello di conduzione ed è libero di muoversi, contribuendo così al flusso d'elettricità ma, ogni volta che un elettrone salta dalla banda di valenza in quella di conduzione, rimane un livello energetico non occupato nella banda di valenza (vacanza o lacuna) ed anche quest'ultima può contribuire alla conduzione.

Nei semiconduttori il moto delle cariche non è dovuto solo al campo elettrico applicato, così come avviene nei metalli, ma è presente anche una corrente cosiddetta di diffusione; quest'ultima è determinata dal moto delle cariche elettriche generato da un gradiente di concentrazione degli elettroni e delle lacune.

L'espressione della corrente in un semiconduttore può essere quindi scritta analiticamente con l'espressione:

$$I = I_n + I_p = qA\mu_n n \mathcal{E} + qA\mu_p p \mathcal{E} + qAD_n \frac{dn}{dx} - qAD_p \frac{dp}{dx}$$



componente dovuta al campo elettrico applicato



componente dovuta al gradiente di concentrazione degli elettroni e delle lacune

dove:

- A : sezione della porzione di semiconduttore
- q : carica elettrone
- n : concentrazione di elettroni
- p : concentrazione di lacune
- \mathcal{E} : campo elettrico
- σ : conducibilità elettrica
- μ_n : mobilità degli elettroni
- μ_p : mobilità delle lacune
- D_n : costante di diffusione degli elettroni
- D_p : costante di diffusione delle lacune



Quando un flusso luminoso investe il reticolo cristallino del silicio, si ha la liberazione di un certo numero di elettroni, al quale corrisponde la creazione di un egual numero di lacune. Nel processo di ricombinazione ogni elettrone, che capiti in prossimità di una lacuna, può occuparla, restituendo una parte dell'energia che possedeva sotto forma di calore. (Fig. 2.5)

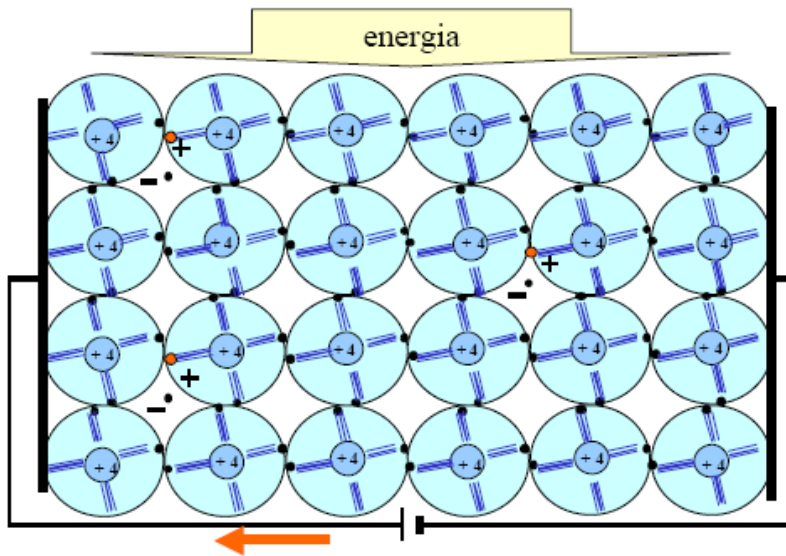


Fig. 2.5

Per sfruttare l'elettricità è necessario creare un moto coerente di elettroni (e di lacune), ovvero una corrente, mediante un campo elettrico interno alla cella. Il campo si realizza con particolari trattamenti fisico-chimici, creando un eccesso di atomi caricati positivamente in una parte del semiconduttore ed un eccesso di atomi caricati negativamente nell'altro.

I cristalli di silicio possono essere "drogati", ovvero si inseriscono nella struttura cristallina delle impurità; in particolare, degli atomi di silicio vengono sostituiti con atomi del V gruppo della tavola degli elementi (in genere Fosforo: P) detti donatori o con degli atomi del III gruppo (in genere Boro: B), detti accettori. Nel primo caso si introduce nell'orbita più esterna un elettrone in più di quelli necessari per chiudere l'orbita stessa. Questo elettrone risulta debolmente legato (frazione di eV) e quindi ha bisogno di una modesta energia per saltare in banda di conduzione. Materiali con questo tipo di conducibilità, dovuta prevalentemente a cariche negative, sono detti di

tipo n. Nel secondo caso si aumenta, invece, la concentrazione di lacune. Materiali con questo tipo di conducibilità, dovuta prevalentemente a cariche positive, sono detti di tipo p. (Fig. 2.6)

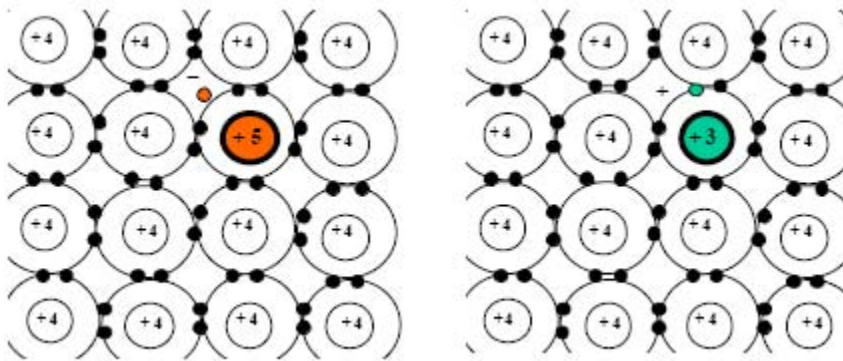


Fig. 2.6 Silicio di tipo n e di tipo p

Un cella fotovoltaica è costituita dall'accoppiamento di un semiconduttore di tipo p e uno di tipo n (giunzione p-n). Attraverso la superficie di contatto dei due semiconduttori alcuni elettroni passano dal materiale di tipo n a quello di tipo p, mentre alcune lacune si spostano in senso contrario. Il materiale di tipo n acquista, di conseguenza, una debole carica positiva, mentre quello di tipo p diventa leggermente negativo. Intorno alla zona di confine si genera, pertanto, un campo elettrico diretto dal materiale di tipo n a quello di tipo p, cui è associata una differenza di potenziale V_e . Questo strato impedisce ogni ulteriore diffusione nei due versi dei portatori di carica. (Fig. 2.7)

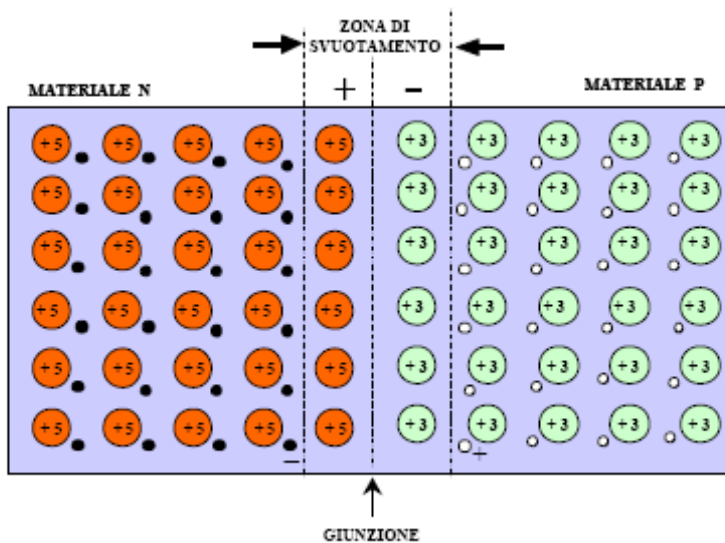


Fig. 2.7 Giunzione p-n

Connettendo il cristallo n al polo positivo di un generatore e il cristallo p a quello negativo, si rafforza il campo elettrico, che si è instaurato in precedenza e che impedisce il passaggio di corrente elettrica. Se si invertono le connessioni del generatore, la corrente fluisce nel circuito. La giunzione p-n è quindi un dispositivo a senso unico, perché consente il passaggio della corrente in un solo senso: dal materiale di tipo p a quello di tipo n (diodo a semiconduttore). Quando una cella fotovoltaica assorbe una radiazione luminosa, i cui fotoni relativi possiedono un'energia $E = h\nu$ (h è la costante di Plank e ν è la frequenza del fotone), se l'energia dei fotoni $h\nu$ è inferiore a E_g , essi non potranno essere catturati da elettroni, poiché questi verrebbero portati ad un livello energetico della banda proibita, ove nessun elettrone può portarsi. Se invece $h\nu > E_g$ l'elettrone, che cattura il fotone, viene portato nella banda di conduzione, lasciando ionizzato (lacuna) il suo atomo originario di appartenenza. Una volta nella banda di conduzione, l'elettrone dissipa termicamente la quantità di energia $h\nu - E_g$ ed è libero di muoversi in tale banda. In questo caso si dice che si è verificato un processo di generazione di coppia elettrone-lacuna. Se l'assorbimento avviene nella zona di giunzione, l'elettrone viene sospinto, a causa del campo elettrico ivi presente, (si ricordi che il campo elettrico ha direzione da n a p e quindi favorisce il passaggio di lacune da n a p e quello di elettroni da p a n) verso il materiale di tipo n e la lacuna verso il materiale di tipo p. Se l'assorbimento avviene in prossimità della giunzione, ne consegue che la lacuna raggiunge per diffusione la zona di carica spaziale e viene immediatamente portata, dal campo di giunzione, nel materiale p. Se, infine, l'assorbimento avviene lontano dalla zona di giunzione, le cariche si ricombinano dopo un certo tempo. In pratica la zona p diventa meno negativa, perché ha perso degli elettroni e la zona n meno positiva, perché ha perso delle lacune. Se i due cristalli sono connessi da un filo conduttore, l'equilibrio si ristabilisce mediante un flusso di elettroni dal cristallo n a quello p. L'assorbimento della radiazione luminosa provoca così una corrente elettrica continua nel filo (Fig. 2.8).

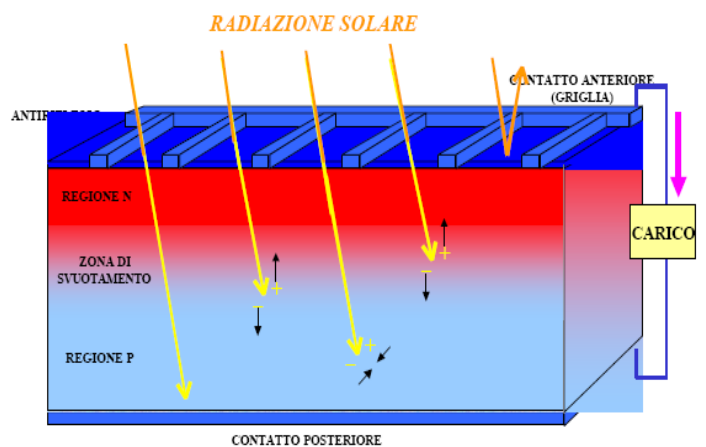


Fig. 2.8 Struttura della cella

2.3 La cella fotovoltaica: caratteristiche elettriche.

La cella fotovoltaica, al buio, è sostanzialmente un diodo di grande superficie. Esponendola alla radiazione solare, essa si comporta come un generatore di corrente, il cui funzionamento può essere descritto per mezzo della curva caratteristica tensione-corrente, come mostrato in fig.2.9

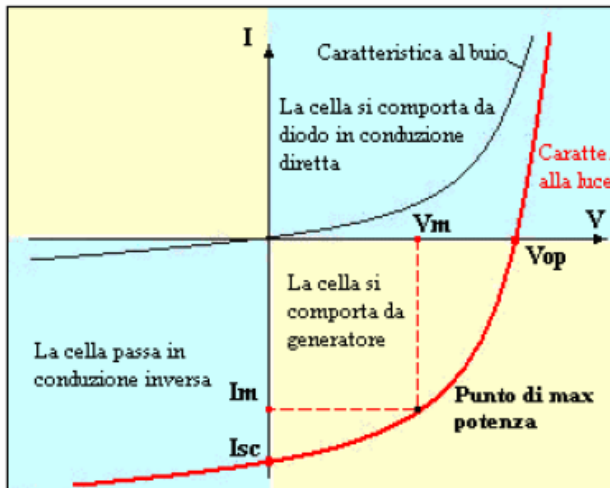


Fig. 2.9 Curva caratteristica tensione-corrente

Se si alimenta con potenziale positivo V il lato p (ovvero introduciamo cariche positive al lato p , o, equivalentemente, cariche negative al lato n), non si ha passaggio di corrente per piccoli valori di V , perché il potenziale esterno viene contrastato dalla barriera di potenziale V_e , generata dal doppio strato di cariche alla giunzione; quando, invece, V tende a V_e , il dispositivo diviene un buon conduttore. La corrente è dovuta sia al moto di lacune entro il materiale p che al moto di elettroni nel materiale n . Questi portatori di segno opposto si muovono verso la giunzione, che possono attraversare dato che il potenziale esterno ha abbassato il valore del potenziale di contatto che su essa insisteva.

Se, invece, invertiamo il segno del potenziale, non si può avere conduzione; in questo caso, infatti, il potenziale esterno si somma a quello della barriera. Solo i portatori minoritari, ossia le lacune presenti nel materiale n e gli elettroni presenti nel p , sono facilitati dal maggior valore del potenziale di barriera ad attraversare la giunzione. Poiché, però, la concentrazione dei portatori minoritari è sempre molto bassa, la corrente, che si ha per polarizzazione inversa, è estremamente modesta.

La corrente che passa nella cella nel caso di alimentazione con potenziale V è data dalla espressione della corrente che attraversa un diodo in conduzione diretta:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{NKT}} - 1 \right)$$

dove:

q : carica elettrone

K : costante di Boltzman (1.38×10^{-23} J/°K)

T : temperatura (°K)

I_0 : costante che dipende dalle caratteristiche dei due semiconduttori

N : coefficiente compreso tra 1,2 (dipende dai fenomeni di generazione e ricombinazione che avvengono nella zona della carica spaziale (per un diodo ideale $N=1$))

La quantità $VT = KT/q$ è chiamata *potenziale termico*.

L'espressione analitica di I_0 è la seguente:

$$I_0 = A_0 \cdot T^3 \cdot e^{\frac{-E_g}{KT}}$$

A_0 : costante dipendente dal semiconduttore adottato.

Quando la cella è illuminata con fotoni di frequenza $n > E_g/h$, la giunzione diviene una sorgente di coppie elettrone-lacuna. La tensione ai capi della cella raggiunge, a circuito aperto, un valore (V_{op}) massimo, mentre in questa condizione la corrente del dispositivo è nulla. Se la cella è chiusa in corto circuito, si misura una corrente massima denominata I_{cc} con una tensione nulla agli estremi.

Quando è presente un carico esterno, la corrente I_{CC} diminuisce di una quantità pari a I_D , di direzione opposta a quella generata dal processo fotovoltaico e ciò consegue dal fatto che, con un carico esterno, la cella diventa un diodo a cui viene applicata una tensione.

Se scegliamo per convenzione che la fotocorrente sia positiva, la I_D è negativa. Il circuito equivalente della cella è rappresentato in (Fig.2.10)



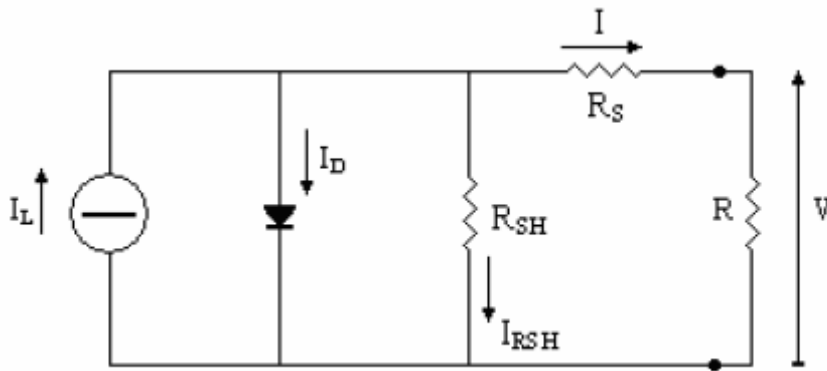


Fig. 2.10 Circuito equivalente della cella

La corrente I_L è quella generata dalla luce; la sua intensità è proporzionale al numero dei fotoni con frequenza $n > E_g/h$.

La corrente I_D è quella che attraversa la giunzione della cella; la sua espressione come si è visto è data da:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qV}{NKT}} - 1 \right)$$

La corrente I è quella che fluisce nel carico ed è quella che, ai fini pratici, ci interessa conoscere.

La R_S è la resistenza parassita della cella e comprende la resistenza dei due strati di materiale che costituiscono la cella e la resistenza ohmica dei contatti stessi. La resistenza R_{SH} , detta resistenza di shunt, rappresenta tutte quelle perdite dovute alle correnti di dispersione che si verificano all'interno della cella.

L'equazione caratteristica della cella illuminata diviene dunque:

$$I = I_L - I_D - I_{RSH} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V-I \cdot R_S)}{NKT}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}}$$

Disponendo dell'espressione della corrente generata da una cella fotovoltaica illuminata e moltiplicandola per la sua tensione, ricaviamo la potenza generata che possiamo graficamente rappresentare: (Fig. 2.11)

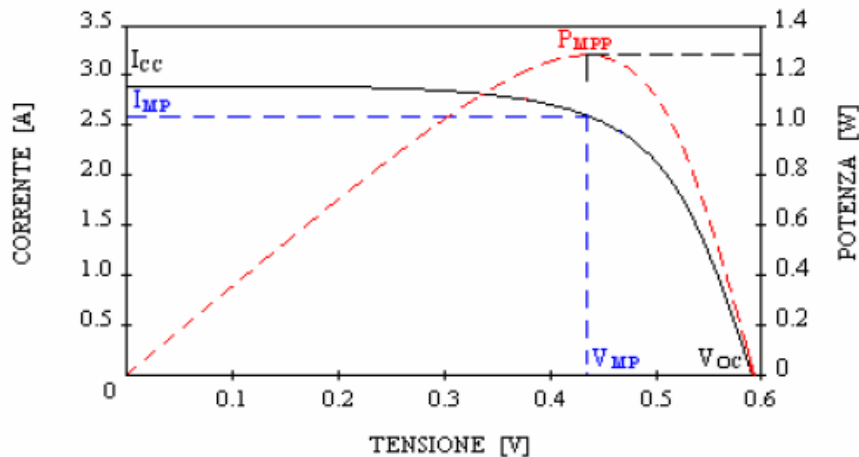


Fig. 2.11 Curva caratteristica tensione-corrente e tensione-potenza

Se, come spesso accade, R_S e R_{SH} sono trascurabili, V coincide col potenziale V_R che la cella trasmette al carico.

La corrente I_{CC} , per $V = 0$, è detta corrente di corto circuito (short circuit) ed è la massima corrente che la cella può erogare fissata l'illuminazione; essa è data dall'espressione:

$$I_{cc}(t) = I_L(t) - I_0(t) \left(e^{\frac{q \cdot I_{cc}(t) \cdot R_S}{NKT(t)}} - 1 \right) - \frac{I_{CC}(t) \cdot R_S}{R_{SH}}$$

In condizioni normali risulta che $R_S \ll R_{SH}$ e che l'esponente dell'esponenziale è molto minore di uno, di conseguenza il terzo termine dell'equazione può essere trascurato e l'esponenziale può essere approssimato mediante la sua serie esponenziale arrestata al 1° ordine, cioè come $e^{x^*} \approx 1 + X$.

Allora si ha:



$$I_{CC}(t) \cong I_L(t) \frac{n \cdot K \cdot T(t)}{n \cdot k \cdot T(t) + q \cdot I_0 \cdot R_S}$$

Ricaviamo adesso l'espressione di $I_L(t)$:

$$I_L(t) \cong I_{CC}(t) \left[1 + \frac{q \cdot I_0 \cdot R_S}{n \cdot K \cdot T(t)} \right]$$

Il secondo termine dentro parentesi quadra può essere trascurato rispetto ad uno; infatti la resistenza R_S in condizioni di corto circuito è insignificante e I_0 , misurato per $T = 300^\circ\text{K}$, $E_g = 1,1\text{eV}$ e $R_S = 0,1247 \text{ W}$, è dell'ordine $1,5 \cdot 10^{-10}$. Quindi risulta:

$$I_L(t) \cong I_{CC}(t)$$

Possiamo pertanto affermare che la corrente di corto circuito ICC è proporzionale all'irraggiamento. La differenza di potenziale, che si ha ai capi della cella fotovoltaica in condizione di circuito aperto, è indicata con V_{OC} (open circuit).

La sua espressione analitica si può ricavare da quella della corrente I , ponendola appunto uguale a zero e trascurando le resistenze R_S e R_{SH} :

$$V_{OC} = N \cdot V_T \cdot \ln \frac{I_L + I_0}{I_0}$$

Le variabili fondamentali, che influiscono sulla caratteristica di una cella fotovoltaica, sono tre:

- l'intensità della radiazione solare
- la temperatura

- l'area della cella.

L'intensità della corrente di corto circuito varia in modo proporzionale al variare dell'intensità dell'irraggiamento, mentre l'intensità della radiazione solare non ha un effetto rilevante sul valore della tensione a vuoto. Da ciò consegue che la tensione a vuoto è presente con valori prossimi a quello massimo anche a bassi valori di radiazione solare. Come si evince dalla fig. 2.12, la tensione a vuoto tra i casi di massimo e minimo valore d'irraggiamento varia tra 0.50 e 0.60 V.

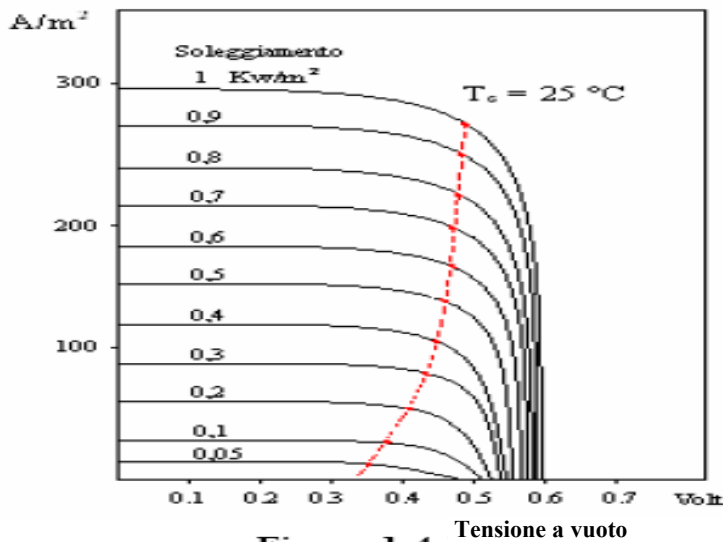


Figura 1-4

Fig. 2.12 Tensione a vuoto in funzione dell'irraggiamento

Il solo modo per evitare la presenza di tensione ai morsetti di un generatore fotovoltaico consiste nell'oscurare totalmente la superficie captante.

Quando aumenta la temperatura della cella si registra una diminuzione della tensione a vuoto V_{oc} di circa $2,3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ e congiuntamente, un aumento della corrente di cortocircuito I_{cc} pari a circa $0,2\% /^{\circ}\text{C}$ (Fig. 2.13)

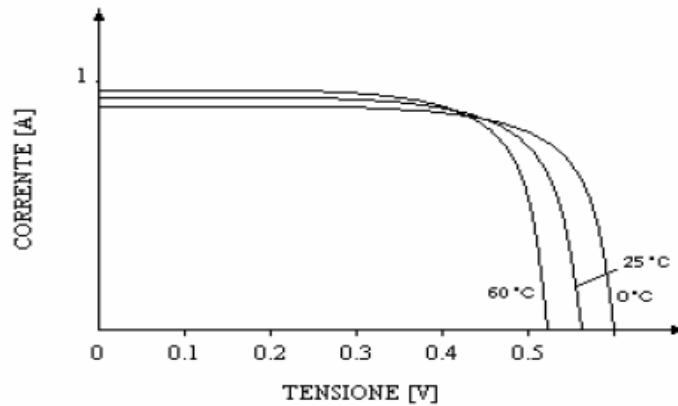


Fig. 2.13

I due fenomeni, anche se di segno opposto, si traducono in pratica in una diminuzione della potenza di picco valutabile intorno al 6-7% per ogni aumento di 10° C della temperatura delle celle; vedi fig. 2.14

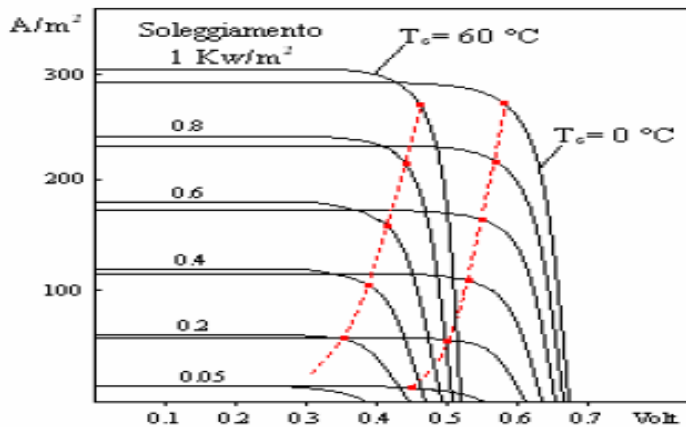


Fig. 2.14

Per quanto attiene l'area della cella, si rileva che essa non incide sul valore della tensione a vuoto, ma ovviamente con maggior superficie si produrrà maggior corrente.

Poiché la potenza di una cella fotovoltaica varia al variare della sua temperatura e della radiazione, per poter fare dei confronti sono state definite delle condizioni standard di collaudo (STC) sotto le quali la cella eroga in watt di picco (Wp).

Tali condizioni includono: una temperatura della cella di 25 °C, l'intensità della radiazione di $1kW/m^2$ e la distribuzione dello spettro della luce.



2.3.1 Efficienza della cella fotovoltaica.

Il regime di funzionamento di una cella è quello in cui esso fornisce un determinato valore di potenza data dal prodotto $P = V \times I$; questa raggiunge il suo valor massimo nel cosiddetto punto di funzionamento della cella o punto di *massima potenza*. Quest'ultimo è individuato da un determinato valore di tensione, V_m e di corrente I_m .

Un parametro caratteristico della cella solare è l'*efficienza di conversione* η : è definita dal rapporto tra la potenza massima, per unità di superficie, fornita dalla cella stessa e l'intensità solare incidente sempre per unità di superficie. Analiticamente la sua espressione è la seguente:

$$\eta = \frac{V_m \cdot I_m}{E_{in}}$$

Mediamente il valor massimo dell'efficienza di conversione di una cella si trova tra il 20% ed il 25%.

I motivi di tale bassa efficienza sono molteplici e possono classificarsi nelle seguenti categorie:

Di tutta l'energia, che investe la cella solare sotto forma di radiazione luminosa, solo una parte viene convertita in energia elettrica disponibile ai suoi morsetti. L'efficienza di conversione per celle commerciali al silicio è compresa tra il 17 % e il 20%, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 32,5%, ma si tratta, comunque, di prototipi. I motivi di tale modesta efficienza sono molteplici e possono essere raggruppati nelle seguenti quattro categorie:

- riflessione: non tutti i fotoni che incidono sulla cella penetrano al suo interno, dato che in parte sono riflessi dalla superficie della cella e in parte incidono sulla griglia metallica dei contatti;
- per rompere il legame tra elettrone e nucleo è necessaria una ben determinata quantità di energia e non tutti i fotoni incidenti ne possiedono in modo sufficiente. Alcuni fotoni troppo energetici generano, inoltre,

coppie elettrone-lacuna, dissipando in calore l'energia eccedente quella necessaria a staccare l'elettrone dal nucleo.

- ricombinazione: non tutte le coppie elettrone-lacuna generate sono raccolte dal campo elettrico di giunzione e inviate al carico esterno, poichè nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno opposto e, quindi, ricombinarsi;
- resistenze parassite: le cariche generate e raccolte nella zona di svuotamento devono essere inviate all'esterno. L'operazione di raccolta è compiuta dai contatti metallici, posti sul fronte e sul retro della cella. Anche se durante la fabbricazione viene effettuato un processo di lega tra silicio e alluminio dei contatti, permane una certa resistenza all'interfaccia ed essa provoca una dissipazione che riduce la potenza trasferita al carico. Nel caso di celle al silicio policristallino, l'efficienza è ulteriormente ridotta a causa della resistenza che gli elettroni incontrano ai confini tra un grano e l'altro e, soprattutto, nel caso di celle al silicio amorfo, per la resistenza dovuta all'orientamento casuale dei singoli atomi.
- *Resistenza superficiale della cella.* Si perde il 3% a causa della resistenza superficiale della cella.
- infine c'è una perdita del 3% per la riflessione dell'energia in prossimità dell'estremità superiore della cella.

Considerando tutte queste cause di dispersione, l'energia elettrica disponibile è pari appena al 16 % dell'energia solare incidente.(Fig. 2.15)

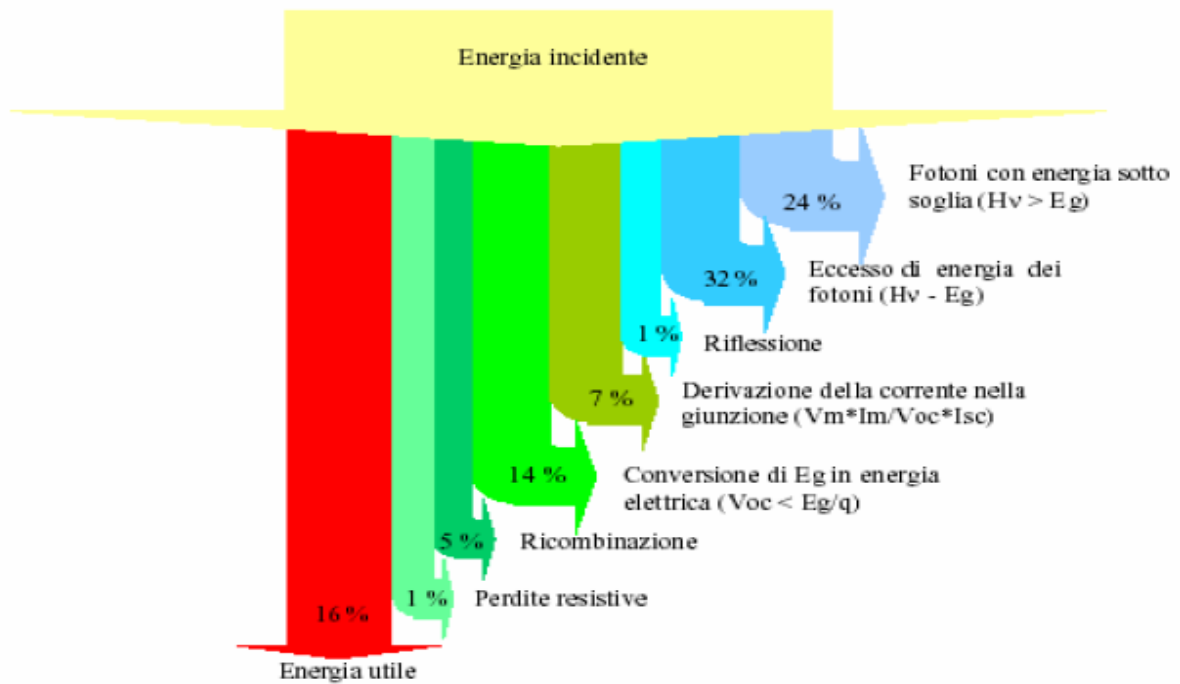


Fig. 2.15 Efficienza della cella

Dal punto di vista tecnologico si distinguono diversi tipi di celle solari al silicio:

- Celle solari al silicio *monocristallino*. Sono le più efficienti, ma anche le più costose. Sono costituite da una struttura monocristallina, nella quale tutti gli atomi sono ordinati secondo una struttura reticolare precisa al fine di migliorarne la conducibilità. Queste celle presentano un rendimento di circa 15-16%. Il wafer di una cella monocristallina viene prodotto con il metodo Czochralsky, che consiste nella cristallizzazione di una massa di silicio fuso a partire da un seme di silicio monocristallino molto puro. Tale seme viene immerso nel silicio fuso ed estratto molto lentamente, in modo che le altre parti, che vi si agglomerano, presentino la medesima struttura cristallina del seme originario. Da questo processo si ottiene una carota silicio monocristallino. La carota viene in seguito affettata in modo da ottenere dei wafer, che verranno poi opportunamente drogati. Il colore di tali celle risulta quindi uniforme.



- Celle solari al silicio *policristallino*. Sono costituite da una struttura a più cristalli e risultano meno efficienti, ma più economiche delle prime. Il loro rendimento è compreso tra il 12 –13%. Il wafer della cella policristallina si ottiene dalla fusione e successiva ricristallizzazione del silicio, non propriamente puro, che proviene dallo scarto dell'industria elettronica. Dal processo di ricristallizzazione viene fuori un lingotto di silicio, che viene affettato per ottenere dei parallelepipedi, il cui colore non è uniforme ed in cui si possono distinguere le diverse cristallizzazioni.



- Celle solari in silicio *amorfo*. La loro struttura non è ordinata in cristalli, risultano però le più economiche, anche se le meno efficienti. Il loro rendimento è circa 8%. Sono delle celle costituite da film sottili di silicio allo stato amorfo. Un vantaggio di tali celle è dato dalla versatilità delle loro forme ottenibili e delle loro tonalità quasi trasparenti.

- Celle solari al silicio *amorfo a tripla giunzione*. Sono costituite da più giunzioni a diverse profondità, in modo tale da avere un buon rendimento durante tutta la giornata. Ogni giunzione risulta, infatti, particolarmente sensibile a differenti lunghezze d'onda della luce. Il loro rendimento si può approssimare a quello delle celle policristalline. Esistono, per particolari applicazioni, celle solari a tripla giunzione in GaAs. Tali celle raggiungono rendimenti del 22%, ma risultano particolarmente costose.
- Celle *Tandem*. Sono formate da più giunzioni di diversi semiconduttori in modo che possano sfruttare al meglio tutto lo spettro della luce che le investe

Una singola cella può dare una tensione che è prossima a 0.5 V. Per ottenere tensioni superiori a tale valore, si possono porre quindi più celle in serie, dando luogo al modulo fotovoltaico.

2.4 Modulo fotovoltaico.

La conversione della radiazione solare in una corrente di elettroni, come si è visto, avviene nella cella solare, un dispositivo costituito da una sottile fetta di materiale semiconduttore, molto spesso silicio. Essa è generalmente di forma quadrata e di superficie pari a circa 100 cm^2 ; produce, nelle condizioni di soleggiamento standard (1000 W/m^2 di intensità luminosa e $25 \text{ }^\circ\text{C}$), una corrente di 3 A con una tensione di 0.5 V, quindi una potenza di 1.5 W. Per ottenere i valori di tensione e corrente necessari al carico applicato, più celle vengono collegate in serie fino a raggiungere il livello di tensione adeguato e poi, eventualmente, collegate tra loro in parallelo per raggiungere il valore di corrente richiesto. Si creano in tal modo i cosiddetti moduli.

Il modulo è formato da un numero di celle, che assumono generalmente valori standard: 36, 64, 72, cui corrispondono dimensioni di circa di $1 \times 0,5 \text{ m}$, $0,8 \times 0,8 \text{ m}$, $1 \times 1 \text{ m}$. Le celle sono ricoperte anteriormente con un vetro temprato, di circa 4mm di spessore, che assolve la funzione di permettere il passaggio della luce e di proteggere la parte attiva. Le caratteristiche meccaniche del vetro superiore devono essere tali da assicurarne la calpestabilità, consentendogli, pertanto, di reggere il peso di una persona senza riportare deformazioni apprezzabili; devono, inoltre, essere tali da resistere a condizioni meteorologiche particolarmente severe, rappresentate anche dagli urti conseguenti alla caduta di grandine di grosse dimensioni. La capacità di essere attraversato dalla luce solare deve essere superiore di gran lunga a quella dei normali vetri in commercio, in modo da non pregiudicare il rendimento complessivo del modulo. Per raggiungere tale risultato i costruttori ricorrono a particolari composizioni con basso contenuto di ferro. Tra il vetro e le celle fotovoltaiche è interposto un sottile strato di vinil-acetato di etilene (EVA) trasparente, al triplice scopo di evitare un contatto diretto tra celle e vetro, eliminare gli interstizi che si formerebbero a causa della superficie non perfettamente liscia delle celle ed isolare elettricamente la parte attiva dal resto del laminato.

Sul retro delle celle viene posto un ulteriore foglio di EVA, con funzioni analoghe a quello utilizzato anteriormente. A chiusura del sandwich realizzato, viene in genere utilizzato un foglio di Tedlar (in genere di color bianco), eventualmente rinforzato con fogli metallici e polimerici e infine da un lamierino. Nel caso in cui a chiusura posteriore non ci sia il lamierino, ma un altro vetro con

caratteristiche meccaniche e trasmissive inferiori a quelle previste per il vetro anteriore, il modulo è chiamato a doppio vetro.

I moduli fotovoltaici possono essere usati sia singolarmente sia collegati tra loro in serie e in parallelo, così da formare dei pannelli, delle stringhe e dei campi fotovoltaici. Più moduli vengono collegati a formare un pannello, più pannelli vengono collegati in serie a formare una stringa al fine di raggiungere la tensione nominale. Più stringhe sono collegate tra loro in parallelo, fino a raggiungere la potenza che si desidera installare nell'intero campo fotovoltaico, costituito da tutti i moduli e tutte le loro strutture e connessioni, che fanno capo ad un singolo impianto.(Fig. 2.16)

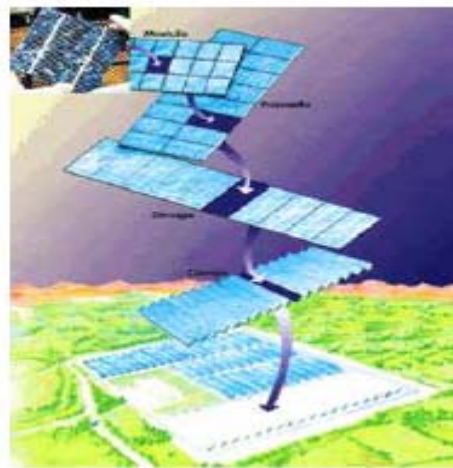


Fig. 2.16

Con tale interconnessione possono verificarsi delle anomalie, che rendono più complesso il progetto dell'impianto. Considerando il funzionamento elettrico della serie di celle, si nota che, nel caso una cella venisse oscurata, quest'ultima cesserebbe di comportarsi da generatore, funzionando, invece, come un diodo polarizzato inversamente. Questo comporterebbe il blocco della corrente generata, azzerando così l'energia prodotta da tutta la catena, ossia dal modulo. Nel caso in cui una delle celle sia solo parzialmente oscurata, la corrente che attraversa il modulo è pari a quella che tale cella produrrebbe se presa singolarmente. E' importante fare in modo che, durante il loro funzionamento, i moduli fotovoltaici siano ombreggiati il meno possibile, anche se solo parzialmente. Ogni singolo modulo si comporta come se tutte le celle che lo compongono ricevessero una quantità di radiazione solare, pari a quella captata dalla cella meno esposta; questo si tradurrebbe in una riduzione dell'energia prodotta proporzionale alla percentuale di superficie ombreggiata. Per questo stesso

motivo, se moduli con caratteristiche diverse sono connessi in serie, la resa dell'intera serie di moduli sarà limitata dal comportamento di quello a prestazione più bassa. Si osserva, inoltre, che se in una serie costituita da molte celle o più moduli posti in serie, ne viene ombreggiata una, si può verificare il fenomeno detto hot-spot. La cella oscurata si trova in questo caso polarizzata inversamente, con una tensione uguale o molto vicina alla tensione a vuoto di tutta la serie formata dalle celle rimanenti, ed è esposta quindi al pericolo di entrare in conduzione inversa. In questo caso la cella si troverebbe a dover dissipare la potenza generata dalle rimanenti celle del modulo, provocando un aumento di temperatura localizzato (hot-spot) che può dare luogo, anche con modesti valori d'irraggiamento solare, alla distruzione della cella per sovratemperatura.

Per ovviare a questi problemi, i moduli commerciali hanno montato, nella morsettiera della cassetta di terminazione, dei diodi proprio allo scopo di cortocircuitare, e quindi di isolare, il singolo modulo in caso di malfunzionamento. Un diodo può essere inserito in parallelo ai moduli, per consentire il passaggio della corrente proveniente dall'esterno, nel caso in cui il modulo sia contropolarizzato. Tale diodo è detto *diodo di by-pass*, perché permette il passaggio di una corrente che, nel caso di contropolarizzazione, sarebbe bloccata dalla cella, evitando la formazione di punti hot spot. Il diodo di by-pass, comunque, deve essere dimensionato per la corrente diretta dell'intero gruppo di celle in cui è inserito. L'utilizzo dei diodi di by-pass riduce, inoltre, il problema del mismatch nelle serie di celle; il termine mismatch indica la disomogeneità nelle caratteristiche delle celle fotovoltaiche le quali, sebbene provengano dallo stesso processo di fabbricazione, sono leggermente differenti tra loro. Le differenze possono localizzarsi nelle piste di metallizzazione dei contatti, nella densità dello strato protettivo, nelle resistenze dei cavi di collegamento e dei contatti. Questa disomogeneità tra le caratteristiche delle celle crea un effetto riduttivo, dal quale scaturisce che la potenza disponibile ai capi di un modulo fotovoltaico non coincide con la somma delle potenze delle singole celle, ma la corrente è limitata dalla cella a prestazione minori. Un ulteriore diodo è collegato in serie alla stringa, in modo tale che la corrente generata dalle celle per effetto fotovoltaico sia anche la corrente diretta del diodo stesso. Esso prende il nome di *diodo di blocco*, poiché blocca la corrente con verso opposto a quella generata, che causerebbe un funzionamento delle celle non più come generatore ma come carico. Il problema di questo collegamento risulta essere la caduta di tensione sul diodo di blocco con conseguente riduzione della potenza utile. Per dimensionare questo diodo si deve tener

conto della tensione inversa che agisce ai suoi capi, prodotta dall'intera serie di celle cui è collegato. La sua tensione inversa di rottura (tensione di break-down) deve essere maggiore della tensione inversa cui può venir sottoposto. In Fig.2.17 è riportato lo schema completo di un campo fotovoltaico completo dei diodi di protezione:

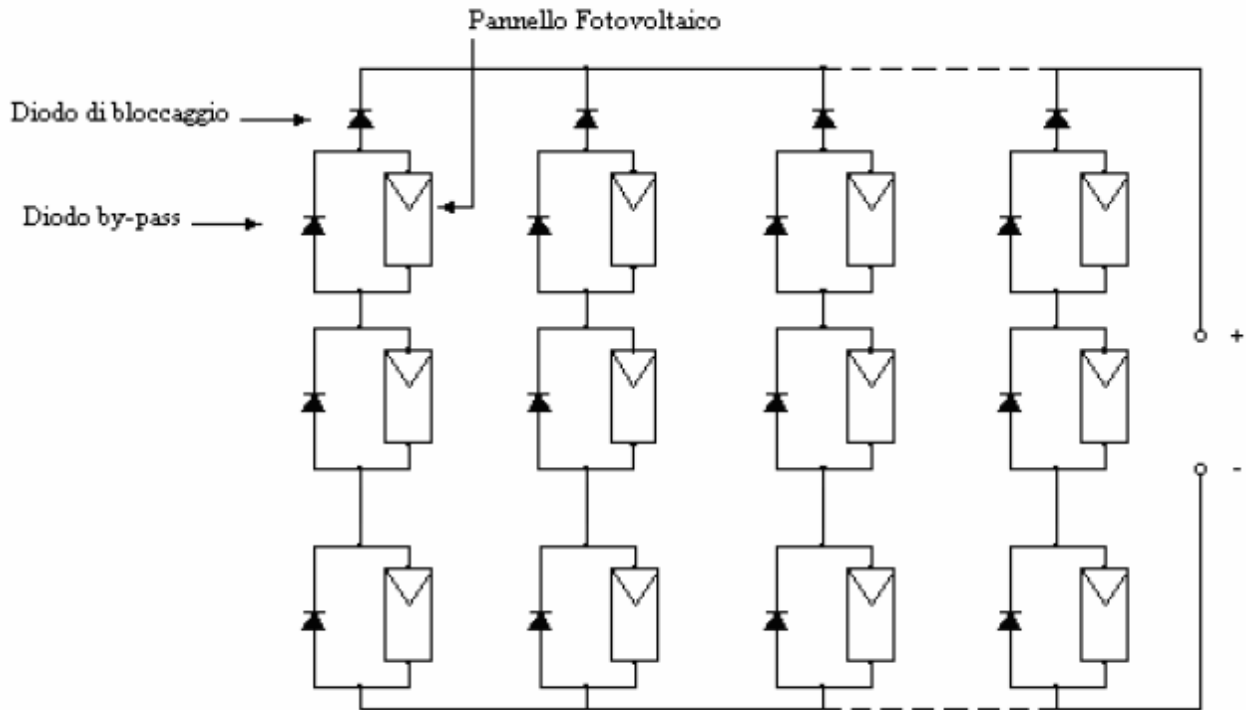


Fig. 2.17 Campo fotovoltaico con diodi di protezione

2.5 Tipologie di sistemi fotovoltaici

L'insieme del generatore fotovoltaico e del sistema di controllo e condizionamento della potenza costituisce il sistema fotovoltaico. Le categorie, in cui si possono classificare i sistemi in base al tipo di connessione con la rete, sono due:

- Sistemi isolati o stand alone
- Sistemi connessi in rete o grid - connected

Il secondo tipo di caratterizzazione degli impianti si basa sulla tipologia dei movimenti permessi ai moduli, in questo caso si ha:

- Sistemi ad inclinazione fissa
- Sistemi ad inseguimento attivo.
- Sistemi ad inseguimento passivo.

Là dove è necessario far assumere alla tensione disponibile verso l'utenza un valore costante, si utilizzano opportuni regolatori di tensione o circuiti di tipo chopper. L'impiego di questi circuiti presenta, inoltre, il vantaggio di poter massimizzare le prestazioni del campo fotovoltaico, facendolo lavorare con valori di tensione e corrente ottimali. Dispositivi di questo genere si chiamano *maximun power point tracker o MPPT*, in altre parole inseguitori del punto di massima potenza.

Se è necessario disporre di energia elettrica sotto forma di corrente alternata monofase o trifase, è indispensabile l'utilizzo di convertitori statici, quali l'inverter. I moderni inverter uniscono alla conversione da continua in alternata altre importanti funzioni, quali la protezione dei carichi della rete a valle, ed integrano sistemi di gestione MPPT.

2.5.1 Sistemi isolati e sistemi connessi in rete.

Sistemi isolati

Questo tipo d'impianto alimenta uno o più carichi elettrici, isolati dalla rete elettrica. Sono impiegati principalmente per dare alimentazione ai carichi in casi di zone isolate quali, ad esempio, baite di montagna, zone dei paesi in via di sviluppo e tutte quelle zone non facilmente elettrificabili. Per garantire la continuità d'alimentazione al carico, si realizza l'immagazzinamento dell'energia con l'ausilio di batterie d'accumulatori di tipo elettrochimico, ad esempio al piombo, e di un regolatore di carica. L'energia fornita dal modulo, ma non utilizzata dal carico o in eccedenza, è usata per la carica delle batterie. Quando il fabbisogno aumenta, o quando il modulo non eroga sufficiente potenza, l'energia immagazzinata è utilizzata. (Fig. 2.18)

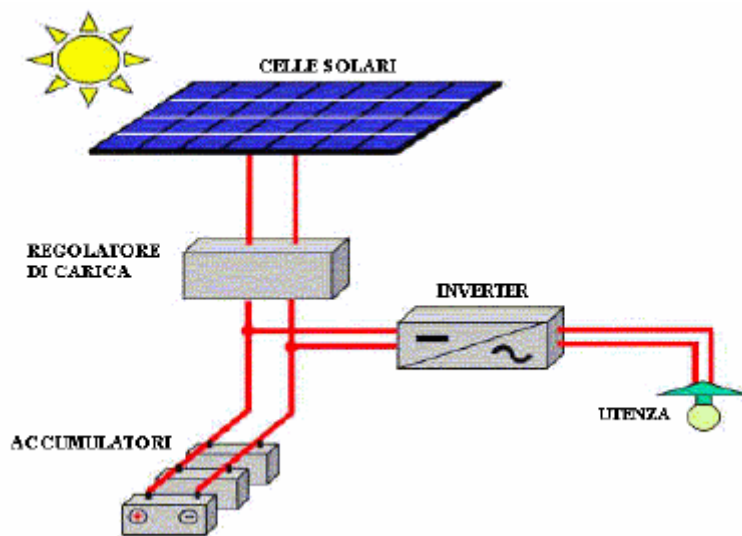


Fig. 2.18 sistema stand-alone

Sistemi connessi in rete.

Gli impianti fotovoltaici connessi in rete possono essere considerati come delle vere e proprie centrali dal punto di vista concettuale. Forniscono l'energia elettrica generata dal processo fotovoltaico direttamente alla rete pubblica di distribuzione dell'energia. Questo tipo di soluzione impiantistica è di recente realizzazione ed è ben rappresentata dal progetto *Tetti fotovoltaici*.

Sono impianti che generano livelli contenuti di potenza, dell'ordine di qualche kW, e immettono quest'energia nella rete grazie ad un convertitore statico, l'inverter, che trasforma tensione e corrente da continue ad alternate. Questi tipi d'impianto non richiedono sistemi d'accumulo dell'energia, perché la presenza della rete elettrica garantisce l'alimentazione delle utenze in qualsiasi condizione, sia di produzione sia di carico.(Fig. 2.19)

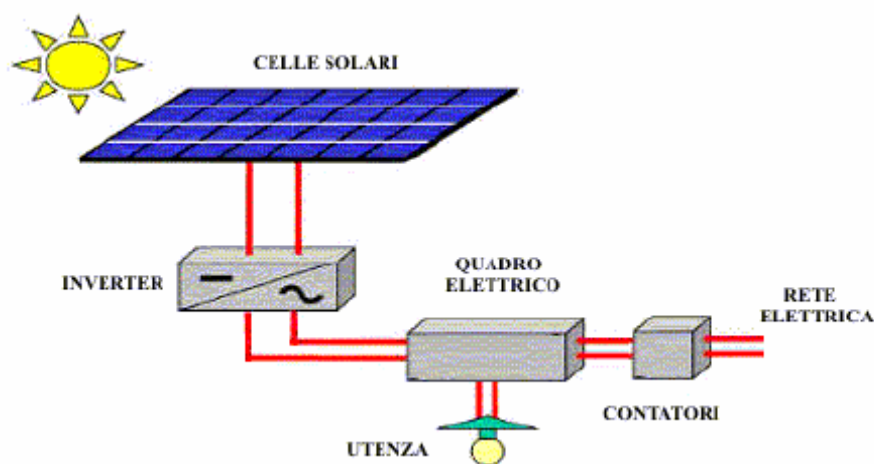


Fig. 2.19 Sistema grid-connected

In questi tipi d'impianti la rete elettrica è vista come un sistema di accumulo, che assorbe energia nei periodi di maggior irraggiamento solare e la restituisce in quelli meno favorevoli. Non è necessario che l'impianto sia dimensionato per far fronte al fabbisogno energetico di tutti i carichi che esso alimenta, perché la rete svolge la funzione di polmone, facendo fronte alla parte d'energia non fornita dall'impianto; in questo modo si possono focalizzare le scelte in base ad altri vincoli, come l'ampiezza delle aree disponibili per i pannelli. Questa tipologia d'impianti, che è definita generazione distribuita, è la più idonea ad una diffusione in larga scala del fotovoltaico, trovando applicazione in edifici urbani esistenti o di nuova realizzazione e sfruttando tutte quelle superfici che, ai nostri occhi, sembrano marginali (pensiline, frangisole).

Data la natura distribuita della fonte primaria, l'irraggiamento solare, risulta poco conveniente adottare centrali di produzione "concentrate", come avviene nelle centrali convenzionali, ma ben più efficace adottare una nuova logica di produzione distribuita, sia geograficamente sia elettricamente.

2.5.2 Sistemi ad inclinazione fissa.

Questo tipo di soluzione per l'orientamento dei pannelli solari è, oggi, il più diffuso, sia perché più economico, sia perché non necessita di manutenzione e quindi è più facile gestirlo.

In questo caso al sistema di pannelli è dato un posizionamento che rimane tale nel tempo. L'orientamento dei moduli solari è molto importante e la posizione ideale di questi ultimi richiede un orientamento, dove possibile, esattamente verso Sud. Per il calcolo dell'angolo d'inclinazione dei pannelli bisogna tener conto dei dati disponibili sulla radiazione solare al suolo, che sono in funzione della latitudine e della stagione e, in seguito, interpretarli in base alle esigenze del carico. Se vogliamo ottimizzare l'energia captata mediamente in un anno sono indispensabili un posizionamento con azimut nullo (orientamento direzione sud) ed un'inclinazione pari alla latitudine meno 10° . In base a ciò, alle nostre latitudini l'inclinazione ottimale sarebbe di circa 35° . Se, invece, vogliamo ottimizzare l'energia captata nella sola stagione estiva, si adottano dei valori d'inclinazione pari alla latitudine meno $20-30^\circ$; per quanto riguarda il periodo invernale le inclinazioni devono essere pari alla latitudine più $10-15^\circ$.



Queste regole, che sembrano di natura empirica, sono invece legate al fatto che, per massimizzare l'energia captata, il pannello deve offrire alla radiazione solare la massima superficie attiva in modo da produrre la massima energia elettrica. A tal fine la superficie del pannello si deve trovare in condizione di ortogonalità ai raggi del sole.

Come già precisato nei precedenti paragrafi il sole assume, in base alla stagione, differente posizione nel cielo e quindi l'inclinazione del pannello per ottenere la massima energia cambia. Spesso però si interviene su superfici preesistenti disponibili ad accogliere i moduli, ma non ottimali

per il loro posizionamento. Se rivolgiamo, ad esempio, l'impianto verso Est od Ovest, si perde circa il 10% dell'energia massima ottenibile rispetto ad un preciso orientamento verso Sud .

Nel caso in cui la superficie, su cui si applica l'impianto fotovoltaico, sia verticale, se l'orientamento è verso Sud, si perde circa il 30% dell'irraggiamento solare annuale (rispetto alla massima captazione di energia che si verifica con l'inclinazione di 30° Sud), mentre, se è verso Est od Ovest, la perdita arriva al 45%.

Per ottenere risultati migliori in termini di sfruttamento della radiazione, si ricorre a sistemi di inseguimento solare, o solar tracker system, grazie ai quali si riesce ad incrementare l'energia captata dal pannello del 30-40% rispetto ad un sistema fisso.

2.5.3 Sistemi ad inseguimento attivo.

Si chiamano sistemi ad inseguimento solare attivo, perché il movimento del pannello è realizzato con l'ausilio di motori elettrici, del tipo passo-passo o in corrente continua, comandati attraverso circuiti elettronici di controllo. Si possono avere sistemi d'inseguimento, i cui movimenti interessano uno o entrambi gli assi di rotazione, quello orizzontale e quello verticale.

La logica di funzionamento è quella di individuare la posizione del sole con l'ausilio di un sensore dedicato e di posizionare il pannello ortogonale rispetto ai raggi.

La posizione del sole è determinata grazie alla variazione di un parametro elettrico (tensione, resistenza).

Il segnale generato dal sensore di posizione non è utilizzabile direttamente per comandare i servomotori, ma necessita di un opportuno condizionamento che è realizzato con porte logiche, circuiti comparatori e trigger, secondo le diverse necessità. Una volta realizzato il condizionamento, il segnale è inviato alla parte centrale di tutto il sistema; si tratta dell'unità logica che elabora il segnale in ingresso e genera gli opportuni comandi dei motori. Per questo compito sono utilizzati i microprocessori o i microcontrollori. Attraverso i segnali che arrivano dal sensore, il microprocessore è in grado di "capire" quando il sole è tramontato e di predisporre il pannello in posizione utile per il giorno successivo.

Con l'utilizzo di questi sistemi di inseguimento è possibile, nelle giornate di sole coperto, sfruttare al massimo la componente indiretta della radiazione solare. Per far ciò basta disporre il pannello in posizione orizzontale.(Fig. 2.20)



Fig. 2.20 Sistemi ad inseguimento attivo

2.5.4 Sistemi ad inseguimento passivo.

Si tratta anche in questo caso di sistemi che servono ad inseguire la traiettoria del sole; si chiamano passivi, perché il movimento non è generato dalla presenza di motori elettrici preposti a questo scopo, ma dall'espansione di un liquido con il calore. L'aumento di volume di un liquido, contenuto in un serbatoio esposto al sole, genera una pressione interna la quale, agendo su un pistone pneumatico, genera un movimento meccanico. Questo movimento è sfruttato per far ruotare il piano di supporto dei pannelli fotovoltaici, in modo tale da potersi presentare sempre in condizioni di massima perpendicolarità con i raggi solari. Per evitare che il liquido riscaldato abbia un effetto non lineare estremamente efficace con forte insolazione, è previsto un sistema di reazione, costituito da una lamiera ricoprente il radiatore di riscaldamento del liquido e ancorata al piano pivottante dei pannelli fotovoltaici; essa ripara dal sole e quindi diminuisce la temperatura del liquido, arrestandone la rotazione. Il movimento solare, di conseguenza, tende a riscoprire il serbatoio,

riscaldandolo ulteriormente. In questo modo è generato un inseguitore, che si autoregola con la temperatura e la posizione solare. Il pannello pivottante è mantenuto in equilibrio instabile in maniera tale che, in assenza di riscaldamento solare, il peso stesso compensi l'azione del braccio pneumatico; questo è necessario per riposizionare l'inseguitore durante la notte al punto di partenza. Il pivottamento è in grado di spostare i pannelli fotovoltaici da est ad ovest, con inclinazione regolabile da 30 a 45 gradi sud.(Fig. 2.21)



Fig. 2.21 Sistema ad inseguimento passivo

In questo tipo di sistemi d'inseguimento il movimento interessa un solo asse, quello di rotazione est-ovest quindi, rispetto ai sistemi attivi, in cui si ha la possibilità di movimentare entrambi gli assi, il rendimento risulta minore. Ciò è compensato in piccola parte dal fatto di non avere più autoconsumo da parte dei servomotori.