



**Università degli
Studi di Padova**

ENERGIE ALTERNATIVE
**Studio analitico dell'energia solare e dei
sistemi fotovoltaici**

Prof. Marco Mariotti

Studente: Himar Alonso Díaz

Indice

1	Introduzione	3
2	Il principio di funzionamento	3
2.1	Principio fisico. Il semiconduttore	4
2.2	La cella fotovoltaica	5
2.3	I pannelli solari	5
3	Radiazione solare disponibile	6
3.1	Fattori geometrici	7
3.2	Fattori meteorologici	11
4	Ottimizzazione del processo fotovoltaico	14
5	Conclusione	14

Elenco delle figure

1	Rappresentazione schematica della giunzione PN	4
2	Celle solari	5
3	Circuito elettrico equivalente dei generatori solare	6
4	Associazione serie e parallelo dei pannelli fotovoltaici	6
5	Variazione della radiazione diretta nel corso dell'anno	7
6	Confronto della lunghezza del giorno T_g e la radiazione giornaliera H_o a Padova (emisfero Nord)	7
7	Componenti della radiazione solare	12
8	Spettro della radiazione diretta e diffusa	13

Elenco delle tabelle

1	Produzione di energia rinnovabile in alcuni paesi europei (in KTEP –migliaia di Tonnellate E)	12
2	Giorno progressivo dell'anno per calcolare le medie mensili	12

1 Introduzione

Nell'anno 1839 Edmond Becquerel riuscì a produrre corrente elettrica irraggiando una soluzione elettrolitica contenente due elettrodi di materiali diversi [5]. Fu essa la prima evidenza storica che la energia luminosa potesse essere convertita in energia elettrica. Nella prima metà del 1900 si sono sviluppati delle importanti teorie ed esperimenti – spinte soprattutto dalle scoperte dei semiconduttori– che portarono alla comparsa delle celle fotovoltaiche nel 1954 nei *Bell Laboratories*, ad opera di Chapin, Fuller e Pearson.

La produzione di energia fotovoltaica non era però un'idea attraente –e nemmeno redditizia– per gli stati e le aziende. Nel 1973 la crisi petrolifera motivò la ricerca di fonti energetiche alternative, tra cui quella solare. Negli anni '80 si utilizzavano delle piccole installazioni fotovoltaiche per segnalazione marittima e di emergenza, centri medici, scuole, installazioni di estrazione dell'acqua... La energia fotovoltaica cominciava ad essere allora *un'alternativa* alle fonti energetiche tradizionali, e una *soluzione* per quelle zone non raggiungibili con la rete elettrica.

Dalgi anni '90 in poi sia la produzione di celle fotovoltaiche che la ricerca in questo campo è cresciuta esponenzialmente. Tuttavia, ancora oggi il rendimento dei pannelli fotovoltaici –cioè la quantità di energia solare che viene convertita in energia elettrica– è di approssimativamente $\eta = 16\%$. Ci sono altre tecnologie con cui attualmente si riesce ad avere un rendimento del $\eta = 40\%$ [6], ma la produzione commerciale è ancora proibitiva. Ecco perché sulla Tabella 1 [2] si osserva che nel 2005 la produzione di energia fotovoltaica nei paesi europei, in cui essa è più elevata, è ancora abbastanza bassa rispetto alle altre fonti rinnovabili.

Paese	Energia idraulica	Energia eolica	Energia fotovoltaica
Germania	1684	2341	110
Spagna	1681	1825	7
Italia	3101	202	3
Paesi Bassi	8	178	3

Tabella 1: Produzione di energia rinnovabile in alcuni paesi europei (in KTEP –migliaia di Tonnellate Equivalenti di Petrolio–)

Nel presente lavoro vorrei fare uno “*studio analitico dell'energia solare*”: realizzare un'analisi della geometria e meteorologia della Terra, i fattori che influiscono nei sistemi fotovoltaici per l'approfittamento ottimale dell'energia solare; “*ed i sistemi fotovoltaici*”: esporre il principio di funzionamento delle celle fotovoltaiche, di come l'energia solare si trasforma in energia elettrica. Mostrerò anche un esempio per automatizzare i calcoli e realizzare rappresentazioni grafiche utilizzando il linguaggio Matlab.

2 Il principio di funzionamento

In questa sezione faremo un'esposizione del principio di funzionamento delle installazioni fotovoltaiche; vedremo come è possibile che la radiazione solare possa essere utile per la produzione di energia pulita. Partiremo dalla *giunzione PN* –principio basico di funzio-

namento dei semiconduttori– e arriveremo al *pannello fotovoltaico*, che è l’elemento base di tutte le installazioni fotovoltaiche.

2.1 Principio fisico. Il semiconduttore

La cella fotovoltaica si costruisce a partire dalla *giunzione a semiconduttore*. Nel caso del silicio –il quale è tetravalente, ossia dispone di 4 elettroni di valenza disponibili per i legami molecolari con altri atomi– la giunzione è realizzata ponendo a contatto due cristalli (si veda Fig. 1), uno di tipo P e l’altro di tipo N. Si chiama cristallo di tipo P –oppure *che incorpora il drogante P*– quello che contiene atomi trivalenti (ad esempio di Boro). Invece il cristallo di tipo N –drogante N– quello che contiene atomi pentavalenti (ad esempio Fosforo) [5].

Il cristallo di tipo N contiene elettroni in più, che sono liberi di muoversi nel reticolo cristallino, e lo stesso accade con le *lacune* del cristallo di tipo P. Quando si mettono in contatto i due cristalli, gli elettroni in più del cristallo N fluiscono –si orientano– verso il cristallo P, creando una *regione di carica spaziale*. Ad un certo punto il processo si ferma –condizione di equilibrio, giunzione PN polarizzata– dato che il campo elettrico, che si genera a causa dello spostamento di cariche da un cristallo all’altro, controbilancia il moto di diffusione.

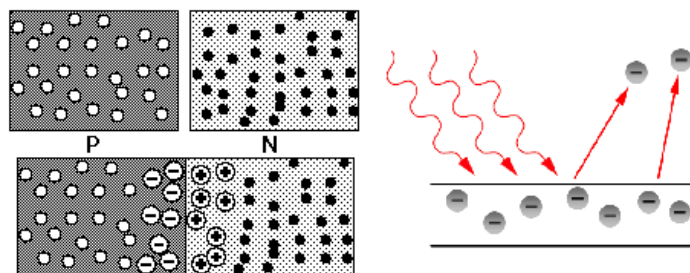


Figura 1: Rappresentazione schematica della giunzione PN

Se a questo punto la giunzione PN viene esposta alla luce, allora la radiazione luminosa, purché di energia sufficiente, libera in tutto il cristallo delle coppie elettrone/lacuna, cioè fornisce di energia sufficiente per muoversi liberamente nel reticolo, creando nel contempo altrettanti posti vuoti (lacune). Il fatto che ci sia la giunzione PN, e quindi il campo elettrico creato da essa, fa che gli elettroni siano attirati verso la zona N (caricata positivamente) e le lacune verso la zona P (caricata negativamente), originando una differenza di potenziale, ossia che la giunzione PN si comporta come se fosse una pila elettrica.

Purtroppo non tutta la radiazione dello spettro è in grado di generare delle coppie elettrone/lacuna, in quanto solo i fotoni con energia sufficiente, cioè con lunghezza di onda inferiore a $1,15\mu\text{m}$ –nel caso del silicio–, sono in grado di attivare questo fenomeno. Esso ci porge un rendimento dell’incirca $\eta = 16\%$, ad una temperatura di 25° .

2.2 La cella fotovoltaica

Il grande *potenziale energetico ed economico* delle celle fotovoltaiche ha permesso il passaggio dal principio teorico alla costruzione industriale. Produrre celle fotovoltaiche sarà redditizio se l'energia che essa riuscirà a produrre è maggiore di quella che è stata usata per produrla (e anche se il costo dell'energia che essa produrrà sarà più economico che utilizzando altre fonti di energia).

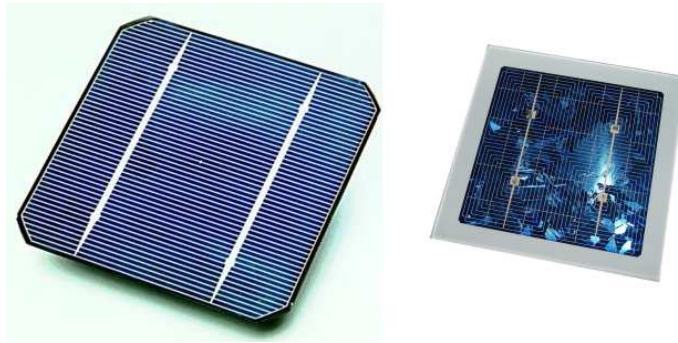


Figura 2: Celle solari

Una cella di Silicio (si vedano gli esempi sulla Fig. 2) di 6 cm di diametro per cui ci sono voluti 416,7kWh (questo valore dipende del processo tecnologico impiegato. Noi abbiamo supposto una macchina di 5kW che produce una cella ogni 5 minuti), esposta a la radiazione solare diretta riesce a produrre circa di 0,5A di corrente a 0,5V ($\approx 90\text{W}/\text{m}^2$) [1]. I fabbricanti garantiscono un tempo di vita di un pannello solare di 15 anni. In quel tempo, avendo una radiazione media effettiva di 3310,1 ore dall'anno 1992 al 1995 [7], abbiamo un'energia totale di:

$$E_t = 90 \times 15 \times 3310,1 \approx 4,468,5\text{kWh}$$

In questo caso l'energia prodotta dalla cella è più grande di quella che ci è voluta per fabbricarla. La produzione di energia fotovoltaica sarà più redditizia quanto maggiore sia la relazione:

$$\frac{\text{Energia prodotta dalla cella}}{\text{Energia necessaria per produrre la cella}}$$

2.3 I pannelli solari

Le celle fotovoltaiche si associano in strutture più grandi (*pannelli solari*) per poter fornire una quantità di energia sufficiente per che possa essere utilizzata in una rete elettrica. Allo stesso modo possono anche associarsi vari pannelli fotovoltaici. La disposizione delle celle si realizza su di una struttura di alluminio. Poiché il rendimento ottimo si ottiene ad una temperatura dell'incirca 25° , e questa temperatura difficilmente si riesce a tenere su di un pannello che è esposto al sole durante tutta una giornata, conviene che i pannelli siano il più sottili possibile, per poter *dissipare il calore*.

Come è stato detto, a livello elettrico la funzione di un pannello solare è quella di un generatore elettrico. Perciò, possiamo considerare un circuito equivalente *Norton* (una

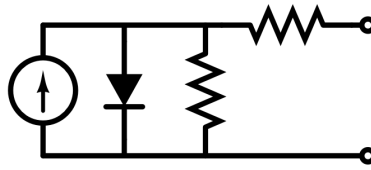


Figura 3: Circuito elettrico equivalente dei generatori solare

fonte di corrente elettrica, polarizzata, e con una resistenza interna) come lo schema della Fig. 3.

Quindi se dobbiamo associare più di una cella (oppure più di un pannello), ci servono le espressioni che utilizziamo di solito per caratterizzare altri sistemi di alimentazione (si veda la Fig. 4):

Quando l'associazione si realizza in *serie* (Fig. 4, sinistra), la differenza di potenziale equivalente è la somma; invece la corrente elettrica è la stessa che potrebbe fornire uno dei due generatori.

$$\boxed{V_t = V_1 + V_2 \quad I_t = I_1 = I_2}$$

Quando si associano in *parallelo* (Fig. 4, destra), la differenza di potenziale equivalente è la stessa che fornirebbe uno dei due generatori; invece la corrente elettrica equivalente è la somma.

$$\boxed{V_t = V_1 = V_2 \quad I_t = I_1 + I_2}$$

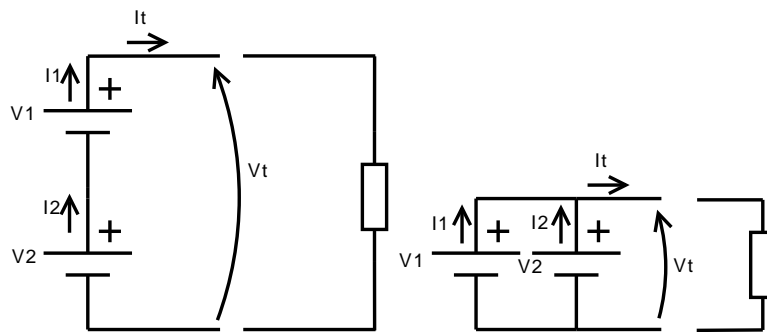


Figura 4: Associazione serie e parallelo dei pannelli fotovoltaici

Quando occorre alimentare molti dispositivi a bassa tensione, questa seconda configurazione è ottima, il numero di moduli da collegare in parallelo dipende dell'intensità di corrente che serve. Quando, invece, l'energia si vuole *trasportare*, conviene utilizzare la configurazione serie perché l'intensità è più bassa e l'energia persa per *effetto Joule* è abbastanza più piccola.

3 Radiazione solare disponibile

La quantità di radiazione solare che arriva sulla superficie terrestre dipende principalmente da due fattori che bisogna analizzare:

Fattori geometrici: La distanza tra il sole e la Terra, l'inclinazione di essa rispetto al asse di rotazione, l'eccentricità dell'orbita terrestre, la localizzazione latitudinale e longitudinale,...

Fattori meteorologici: Influiscono direttamente le nuvole e la nebbia (in genere, le particelle di vapore d'acqua e di polvere presenti nell'aria), e indirettamente gli altri fenomeni meteorologici: vento, pioggia, neve,...

In questo capitolo faremo un riassunto delle equazioni matematiche che ci servono a livello *pratico* per poter conoscere la quantità di radiazione solare (potenza per unità di superficie) che arriva ad un punto geografico preciso, a seconda dei fattori geometrici e meteorologici che ci siano.

3.1 Fattori geometrici

La *costante solare* I_{sc} si definisce [4] come l'energia solare incidente nell'unità di tempo su di una superficie di area unitaria disposta normalmente alla radiazione diretta –cioè, ai raggi in assenza di atmosfera–, e alla distanza media fra sole e Terra. Il valore considerato attualmente più attendibile per la costante solare è [1]:

$$I_{sc} = 1366 \text{W/m}^2 \quad (1)$$

Poiché la distanza tra il sole e la Terra varia periodicamente nel corso dell'anno, la I_{sc} rappresenta in realtà il *valore medio* della potenza specifica. È possibile approssimare analiticamente la potenza solare del giorno n dell'anno da:

$$I_n = r I_{sc} \quad (2)$$

dove [4]:

$$r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \quad (3)$$

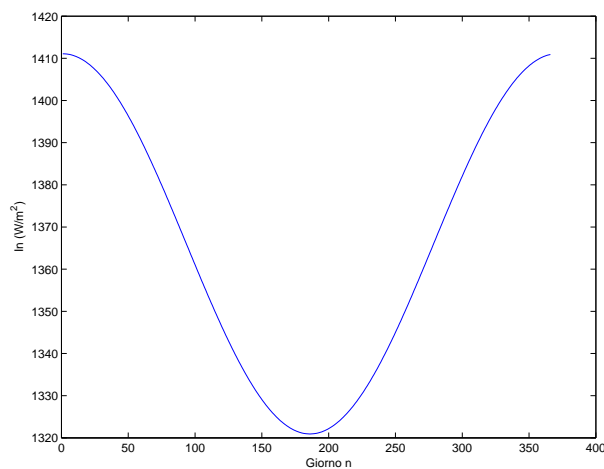


Figura 5: Variazione della radiazione diretta nel corso dell'anno

Esso assume un valore *minimo* nei mesi estivi, e un *massimo* nei mesi invernale. Si può verificare facilmente (Fig. 5) che la variazione massima oscilla entro un intervallo del $\pm 3,3\%$ rispetto al valore medio.

Per analizzare l'influenza della geometria angolare sulla quantità di radiazione solare che arriva ad un punto qualsiasi della Terra bisogna definire prima i seguenti angoli [4]:

Latitudine (ϕ): Equatore nullo, Nord positivo, Sud negativo.

Angolo orario (ω): Mezzogiorno solare nullo, positivo al mattino, negativo al pomeriggio, 15° per ogni ora.

Inclinazione della superficie (β): Angolo fra la superficie ad analizzare e l'orizzontale. Una superficie inclinata di un angolo β e rivolta verso l'equatore alla latitudine ϕ è equivalente ad una superficie orizzontale alla latitudine: $\phi - \beta$.

Angolo azimutale della superficie (γ): Deviazione fra la normale alla superficie e il meridiano locale. Nullo per orientazione verso l'equatore, Est positivo, Ovest negativo.

Angolo di incidenza (ϑ): Angolo compreso tra raggio solare e normale alla superficie. Dall'equazione (2) possiamo definire l'intensità I_0 della radiazione solare incidente su di una superficie *in assenza di atmosfera*, per un angolo di incidenza ϑ della radiazione:

$$I_0 = rI_{sc} \cos \vartheta \quad (4)$$

Declinazione (δ): È l'angolo fra il raggio solare e il piano equatoriale. Esiste una relazione empirica per calcolare la declinazione in funzione del giorno n dell'anno:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (5)$$

Le declinazioni massima e minima ($\pm 23,45^\circ$) stabiliscono gli angoli del solstizio estivo e invernale rispettivamente.

Si può ottenere mediante dei calcoli trigonometrici semplici [4] l'angolo di incidenza per una superficie orizzontale ($\beta = 0$):

$$\cos \vartheta_h = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta \quad (6)$$

Gli angoli d'alba e tramonto sono simmetrici rispetto al mezzogiorno solare e si possono calcolare in corrispondenza ad un angolo di incidenza di 90° del raggio solare con una superficie orizzontale, cioè ponendo eguale a zero la (6):

$$\cos \omega_s = -\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta \quad (7)$$

Da (7) si può calcolare la *lunghezza del giorno* –solare–, T_g :

$$T_g = \frac{2}{15} \omega_s \quad (\text{h}) \quad (8)$$

Dalla (6) si può calcolare la *radiazione solare giornaliera* H_o , incidente su di una superficie orizzontale, integrando¹ la (4):

$$H_o = \frac{24}{2\pi} \int_{-\omega_s}^{\omega_s} I_0 d\omega \quad (9)$$

da cui si ottiene:

$$H_o = \frac{24}{2\pi} r I_{sc} \int_{-\omega_s}^{\omega_s} (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) d\omega$$

$$\boxed{H_o = \frac{24}{\pi} r I_{sc} \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin \delta \right)} \quad (10)$$

Queste espressioni servono per calcolare la potenza solare giornaliera in assenza di atmosfera –cioè, radiazione diretta–. Vediamo come usarle in un esempio concreto:

Esempio: Calcolare la radiazione giornaliera incidente su di una superficie orizzontale il giorno 23 luglio (204mo giorno dell'anno) a Padova (45,42°N). Si determini la lunghezza del giorno.

$$\text{(da (3)) } r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \times 204}{365} \right) = 0,969$$

$$\text{(da (5)) } \delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + 204}{365} \right) = 20,033^\circ$$

$$\text{(da (7)) } \omega_s = \arccos(-\operatorname{tg} 45,42 \times \operatorname{tg} 20,033) = 111,716^\circ$$

$$\text{(da (10)) } H_o = \frac{24}{\pi} 0,969 \times 1366 (\cos 45,42 \cos 20,033 \sin 111,716 +$$

$$+ \frac{\pi}{180} 111,716 \sin 45,42 \sin 20,033)$$

$$\boxed{H_o = 11357,78 \text{Wh/m}^2 \text{giorno}}$$

$$\text{(da (8)) } \boxed{T_g = \frac{2}{15} 111,716 = 14,9 \text{ ore}}$$

Se invece facessimo gli stessi calcoli per la città di Sarmiento (Chubut, Argentina, 45,58°S), che è approssimativamente la stessa latitudine, ma nell'emisfero Sud, avremmo:

$$\boxed{H_o = 3228,84 \text{Wh/m}^2 \text{giorno}}$$

$$\boxed{T_g = 9,09 \text{ ore}}$$

Possiamo anche creare una funzione in Matlab per automatizzare il calcolo, e confrontare più informazione in una grafica. Con la funzione `radiazione` possiamo calcolare i parametri T_g e H_o di un luogo (ϕ), in un giorno preciso (n):

```
% Funzione per il calcolo della
% Lunghezza del giorno (Tg) e la
```

¹Si osservi che l'angolo orario ω che nelle relazioni finali è espresso in gradi, in queste integrali è in radianti.

```

% Radiazione solare giornalera (Ho)
%
% [Tg,Ho]=radiazione(n,phi)
%
function [Tg,Ho]=radiazione(n,phi)
Isc=1366;
n = 1:365;
r = 1+0.033*cos(deg2rad(360*n/365));
delta = 23.45*sin(deg2rad(360*(284+n)/365));
ws = rad2deg(acos(-tan(deg2rad(phi)).*tan(deg2rad(delta))));
Tg = 2/15.*ws;
Ho = 24/pi.*r.*Isc.*(cos(deg2rad(phi)).*cos(deg2rad(delta)).*
    sin(deg2rad(ws))+pi/180.*ws.*sin(deg2rad(phi)).*sin(deg2rad(delta)));

```

Con il seguente *script* faremo gli stessi calcoli (e grafiche) fatti per le città di Padova e Sarmiento, ma per tutti i giorni dell'anno. Sulla Fig. 6 abbiamo il risultato grafico.

```

% Script per calcolare Tg e Ho
% a Padova (emisfero Nord) e
% Sarmiento (emisfero Sud)
%
n = [1:365];
phiPadova = 45.42;
phiSarmiento = -45.58;
[TgPadova,HoPadova] = radiazione(n,phiPadova);
[TgSarmiento,HoSarmiento] = radiazione(n,phiSarmiento);

subplot(1,2,1)
plot(n,TgPadova,'blue',n,TgSarmiento,'red')
xlabel 'Giorno n'
ylabel 'Lunghezza del giorno (ore)'
subplot(1,2,2)
plot(n,HoPadova,'blue',n,HoSarmiento,'red')
xlabel 'Giorno n'
ylabel 'Radiazione giornaliera (W*ore*m2giorno-1)'

```

Molto spesso interessa calcolare la media mensile della radiazione giornaliera. Allora utilizziamo la seguente espressione:

$$\overline{H_o} = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{n=n_1}^{n_2} (H_o)_n \quad (11)$$

dove n_1 ed n_2 sono il primo e ultimo giorno del mese, e H_o a partire dalla (10), scegliendo per ogni mese il giorno ottimale [4] indicato in Tabella 2.

In tutti i calcoli sviluppati finora, otteniamo risultati che corrispondono ad una superficie *orizzontale*. A seconda della latitudine può darsi però che utilizzare una determinata *inclinazione* per i pannelli fotovoltaici ci porga un miglior rendimento. La radiazione giornaliera incidente su di una superficie inclinata di un angolo β si calcola:

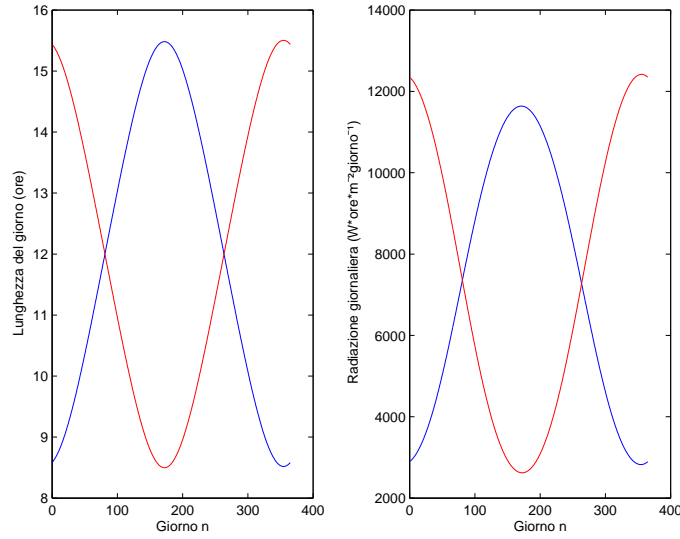


Figura 6: Confronto della lunghezza del giorno T_g e la radiazione giornaliera H_o a Padova (emisfero Nord, blu) e a Sarmiento (emisfero Sud, rosso)

$$H_{o\beta} = \frac{24}{\pi} r I_{sc} \left(\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta \right) \quad (12)$$

con ω'_s :

$$\omega'_s = \min[\omega_s, \arccos(-\operatorname{tg}(\phi - \beta) \operatorname{tg} \delta)] \quad (13)$$

Bisogna precisare che questi calcoli sono validi per superfici inclinate rivolte a Sud. Inoltre, l'angolo conserva un significato fisico solo nel caso in cui non si sia ancora verificato il tramonto del sole.

Il *fattore di trasformazione da orizzontale ad inclinata per la radiazione diretta* R_b ci dice quanto migliore è utilizzare una superficie inclinata, di angolo β , anziché una orizzontale:

$$R_b = \frac{H_{o\beta}}{H_o} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (14)$$

Si può calcolare la *media mensile* del rapporto (nello stesso modo della radiazione giornaliera) indicandola con $\overline{R_b}$; essa si può approssimare con la relazione (14) calcolata per i giorni indicati nella Tabella 2.

3.2 Fattori meteorologici

Non tutta la radiazione solare arriva direttamente sulla superficie terrestre. Una parte viene *riflessa* verso lo spazio, parte viene assorbita dall'atmosfera le cui molecole riscaldandosi emettono radiazioni infrarosse e la rimanente arriva sulla Terra, dopo essersi distinta in due componenti: *diretta* e *diffusa* (si veda la Fig. 7). La proporzione di ognuna di queste componenti dipende delle condizioni meteorologiche; per esempio, in una giornata nuvolosa la radiazione è praticamente tutta diffusa, e viceversa: in una giornata soleggiata predomina la componente diretta.

Mese	Giorno	Data
gennaio	17	17G
febbraio	47	16F
marzo	75	16M
aprile	105	15A
maggio	135	15M
giugno	162	11G
luglio	198	17L
agosto	228	16A
settembre	258	15S
ottobre	288	15O
novembre	318	14N
dicembre	344	10D

Tabella 2: Giorno progressivo dell'anno per calcolare le medie mensili

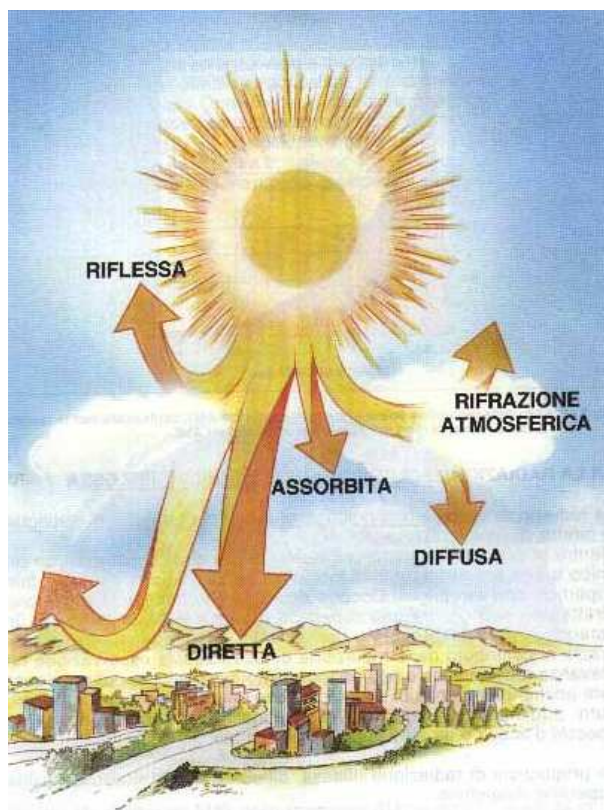


Figura 7: Componenti della radiazione solare

Sulla Fig. 8 si può osservare lo spettro della radiazione solare. Si sono rappresentate due curve: Una con la radiazione *diretta* (con valore massimo di $I_{sc} = 1366\text{W/m}^2$), e l'altra con la radiazione *diffusa*, misurata al livello del mare, con il sole sulla verticale della località –cioè, allo *zenith*–. La radiazione ha dovuto attraversare una massa d'aria m , la cui varia in funzione dalla posizione del sole, essendo più grande all'alba o al tramonto. La m si può calcolare a partire dell'angolo di incidenza della radiazione con la verticale:

$$m = \frac{1}{\cos \vartheta_z} \quad (15)$$

Per dare un ordine di grandezza dell'importanza di assorbimento, si passa dal valore 1366W/m^2 della costante I_{sc} , a un valore di 1000W/m^2 al livello del mare, con cielo sereno e sole allo *zenith*.

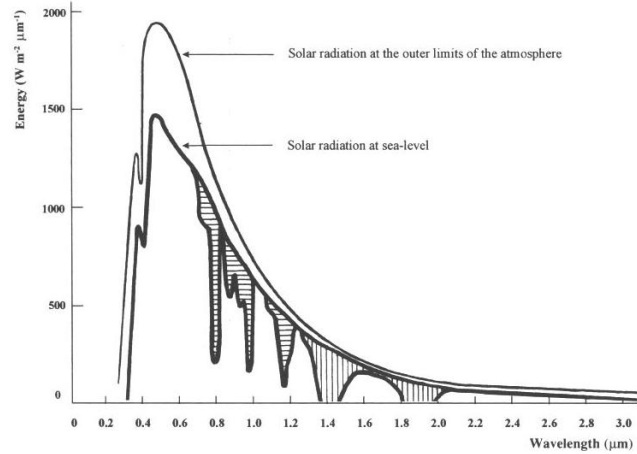


Figura 8: Spettro della radiazione diretta e diffusa

Questo valore sarà più alto per atmosfere molto trasparenti (ad esempio, le *zone desertiche*), e più basso per atmosfere poco trasparenti (ad esempio, le *zone urbane*).

La radiazione globale al livello del suolo è data dalla *somma* della radiazione diretta e della radiazione diffusa. La frazione della radiazione diffusa dipende dall'altezza e dalla latitudine della località considerata, ma anche dal giorno dell'anno e da altri fattori atmosferici come la turbidità, la presenza di vapore d'acqua nell'atmosfera e la nuvolosità, che non sono costanti, e quindi non sono molto attendibili. Perciò, per effettuare la previsione d'energia solare disponibile si usano *dati misurati nel passato* per la località considerata. I dati saranno più rappresentativi purché si riferiscano *ad alcuni anni* di rilevazioni.

Di solito vengono tabulati per ogni località il numero medio mensile \bar{n} di *ore di soleggiamento*, e il *valore medio mensile* \bar{H} della radiazione solare giornaliera incidente su di una superficie orizzontale. Essa sarà sempre ovviamente inferiore a \bar{H}_o ; avrà un valore più vicino a questo quanto più il cielo è sereno, e viceversa più piccolo quanto più aumenta la nuvolosità. Si definisce *l'indice di nuvolosità* medio mensile \bar{K}_h come il rapporto tra \bar{H} e \bar{H}_o :

$$\bar{K}_h = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (16)$$

Allora, con la stessa espressione, conoscendo la nuvolosità in un momento preciso, si potrebbe stimare la proporzione di radiazione solare diretta e diffusa. La seguente funzione Matlab serve per calcolare anche questi nuovi parametri:

```
%
% [Tg,Ho,Hd,H]=radiazionek(n,phi,Kh)
```

%

function [Tg,Ho,Hd,H]=radiazionek(n,phi,Kh)

[Tg,Ho]=radiazione(n,phi,Kh)

H = Ho.*Kh;

Hd = H - Ho;

4 Ottimizzazione del processo fotovoltaico

Ci sono due modi di ottimizzare l'uso di energia solare:

- Con sistemi automatici che orientino il pannello per avere un'angolo d'incidenza perpendicolare durante tutto l'anno (β), e durante tutta la giornata (ω) (dalla (12) si può ottenere la $H_{o\beta}$, e quindi calcolare l'angolo ottimale). Bisogna però che questi sistemi automatici consumino meno energia di quella che hanno bisogno per ottenere il rendimento extra.
- A partire di materiali con un rendimento maggiore: questo fattore dipende soprattutto dall'avanguardia tecnologica, dalla ricerca di nuovi materiali che aiutino ad approfittare meglio l'energia solare. Nel seguente paragrafo abbiamo un esempio.

La filiale solare di *Boeing, Spectrolab*, ha sviluppato una cella fotovoltaica con un rendimento del $\eta = 40,7\%$ [6]. La tecnologia impiegata nella produzione di questa cella utilizza una classe praticamente inesplorata di materiali, che potrebbero portare a ulteriori passi avanti nell'efficienza dei moduli fotovoltaici. Ciò che rende possibile tutto questo è l'aggiunta di strati-tampone di gallio e arsenico tra gli strati di semiconduttore di silicio, che da soli potevano approfittare soltanto una parte molto limitata dello spettro della radiazione solare.

5 Conclusione

I sistemi fotovoltaici presentano oggi come oggi un basso rendimento, poiché nelle migliori condizioni si riesce ad approfittare sempre meno del 16% dell'energia che fornisce il sole. Esso è dovuto dal fatto che la frequenza di funzionamento ottimale dei semiconduttori non coincide con quella in cui la radiazione solare è più energetica, e al riscaldamento dei pannelli. Gli impianti attuali però in zone di latitudini basse o medie sono abbastanza redditizi, si riesce a risparmiare energia con un sistema che inoltre è pulito –l'unico inquinamento che ne deriva è quello che ci è voluto per fabbricarlo–.

Nel presente lavoro si sono esposti anche degli strumenti matematici (e, a partire di essi, altri strumenti informatici) che tengono in conto la geometria della Terra nel Sistema Solare, e alcune condizioni atmosferiche, che ci servono per stabilire la disposizione ottimale (orientazione, inclinamento) dei pannelli solari.

Con gli ultimi studi, le celle fotovoltaiche sono riuscite ad ottenere un rendimento sempre maggiore, ma questa tecnologia avanguardista è ancora proibitiva. Sicuramente il suo inserimento nel mercato abbasserà i prezzi, e fra pochi anni questi nuovi pannelli saranno più accessibili.

Riferimenti bibliografici

[1] **Wikipedia**

L'enciclopedia libera

<http://it.wikipedia.org/>

[2] **Instituto Nacional de Estadística**

Istituto nazionale di statistica spagnolo

<http://www.ine.es/>

[3] **“Fondamenti di Chimica per le Tecnologie”**

R.A. Michelin, A. Munari

CEDAM, 2002

[4] **“Sistemi solari attivi”**

Renato Lazzarin

Franco Muzzio & C. Editore

[5] **“Il fotovoltaico per tutti”**

Francesco Groppi

Editoriale Delfino

[6] **CNET News.com**

Michael Kanellos

http://news.zdnet.com/2100-9596_22-6141527.html

[7] **Número de horas de sol**

Fundación Caja Madrid

<http://www.fundacioncajamar.es/estacion/agrdatos/Clima/meteo/numero.htm>