

1. ENERGIA SOLARE

1.1 FISICA DELLA RADIAZIONE SOLARE

Gli astronomi classificano la nostra stella fra quelle di classe spettrale G2 (*un'utilitaria*, usando un paragone automobilistico). La sua media massa ha bisogno di poca energia per essere contrastata nella sua tendenza a collassare gravitazionalmente: l'energia media irradiata dal Sole, nell'unità di tempo, su una superficie unitaria posta all'esterno dell'atmosfera terrestre ed orientata perpendicolarmente ai raggi solari viene denominata **costante solare** I_{cs} . Il suo valore più recente, misurato per mezzo di satelliti artificiali, risulta pari a 1367 W/m^2 (per inciso, i valori rilevati dai satelliti nel biennio 1995-'96 danno la costante solare in leggera crescita, intorno ai 1380 W/m^2), con distribuzione spettrale mostrata in fig. 1.1 (NASA), detta AM0 (Air Mass zero, assenza di atmosfera); nella stessa figura, è indicata con AM1 (Air Mass one, **atmosfera standard**¹) la distribuzione spettrale della radiazione solare al suolo. La radiazione incidente al suolo si abbassa a circa 1 kW/m^2 , cioè il 75% della radiazione extratmosferica.

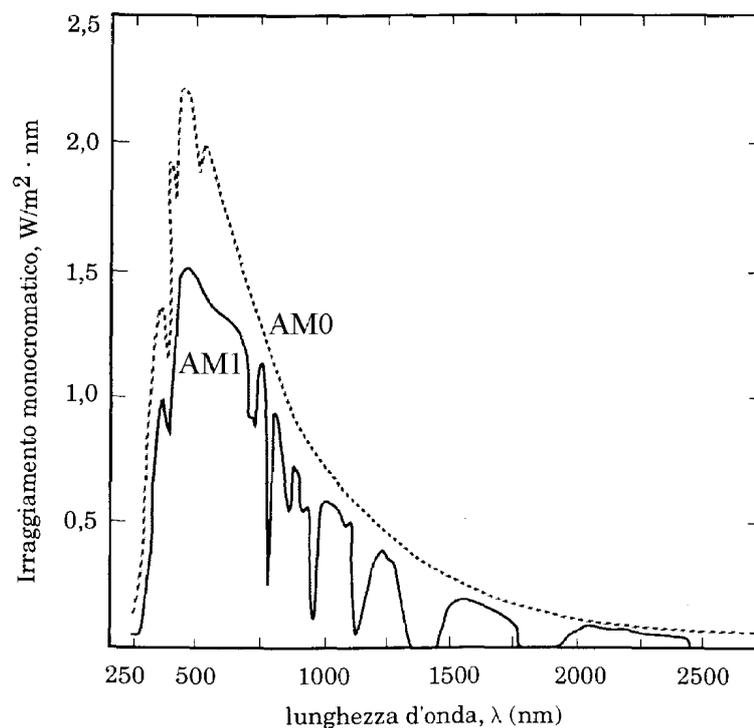


Figura 1.1 - Irraggiamento monocromatico extratmosferico e al suolo (Sole allo zenit). [5]

¹ pressione totale: 101325 Pa (760 mmHg); contenuto d'acqua precipitabile: 2666 Pa; concentrazione di pulviscolo: 300 particelle/cm³; ozono: 373 Pa [10]

Si può fare l'ipotesi che il Sole si comporti, ai fini dell'irraggiamento, come un corpo nero a temperatura uniforme: utilizzando la legge di Stefan-Boltzmann è possibile valutare facilmente la temperatura di tale corpo nero equivalente. Il flusso solare sulla superficie esterna del Sole risulta pari a

$$\Phi_s = I_{cs} \left(\frac{d}{R} \right)^2 = 63.253 \text{ kW/m}^2, \quad (1.1)$$

dove d è la distanza media Terra-Sole ed R è il raggio solare. La temperatura equivalente è pari a

$$T_s = \left(\frac{\Phi_s}{\sigma} \right)^{0.25} \cong 5779 \text{ K},$$

essendo σ la costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

I valori dell'irraggiamento extraterrestre monocromatico alla distanza media Terra-Sole sono :

	ultravioletto	visibile	infrarosso
frazione di energia	0,064	0,430	0,456
energia nell'intervallo (W/m^2)	88	656	623

Si può calcolare, mediante la (1.1), la potenza emessa dal Sole: essa risulta pari a $3,84 \cdot 10^{20} \text{ W}$. La massa convertita in energia in un secondo per effetto delle reazioni di fusione nucleare è di $4,27 \cdot 10^9 \text{ kg}$, alla quale corrisponde una perdita di massa dello 0,0067% in un miliardo di anni. Di questa potenza solo una piccola frazione, pari a $1,73 \cdot 10^{17} \text{ W}$, viene intercettata dalla Terra.

Considerando che mediamente in un anno solo un terzo di questa radiazione raggiunge la superficie terrestre e che il 70% di questa cade sugli oceani, l'energia solare annua incidente al suolo è pari a circa $1,515 \cdot 10^{17} \text{ kWh}$, 1.536 volte più grande del fabbisogno energetico mondiale annuo (pari a $9,55 \cdot 10^{13} \text{ kWh}$ nel 1990).

Per individuare ad un certo istante dell'anno la posizione del Sole nel cielo in una determinata località è necessario definire alcuni angoli caratteristici. Questi angoli sono:

- **la latitudine L** : è l'angolo che la retta passante per la località considerata ed il centro della Terra forma con il piano dell'equatore; è positiva nell'emisfero settentrionale e negativa in quello meridionale;
- **l'altezza o altitudine solare α** : è l'angolo formato tra la direzione dei raggi solari ed il piano orizzontale (complementare dell'**angolo zenitale z**);
- **l'azimut solare a** : è l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud (è positivo prima del mezzogiorno solare);
- **l'angolo orario h** : è la distanza angolare tra il Sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste; è anche pari all'angolo di cui deve ruotare la Terra affinché il Sole si porti sopra il meridiano locale. Tale angolo è positivo nelle ore antimeridiane. Esso risulta pari al numero di ore di distanza dal mezzogiorno moltiplicato per 15 (poiché la Terra ruota di 15 gradi all'ora alla velocità nominale di 360 gradi al giorno);
- **la declinazione solare δ** : è l'angolo che la direzione dei raggi solari forma a mezzogiorno, sul meridiano considerato, col piano equatoriale; risulta anche pari all'angolo che i raggi solari formano a mezzogiorno con la direzione dello zenit sull'equatore e coincide inoltre con la latitudine geografica alla quale in un determinato giorno dell'anno il Sole a mezzogiorno sta sullo zenit (il che può accadere solo fra i tropici); è positiva quando il Sole sta al di sopra del piano equatoriale ed è negativa quando il Sole è al di sotto di esso (vedi fig. 1.2).

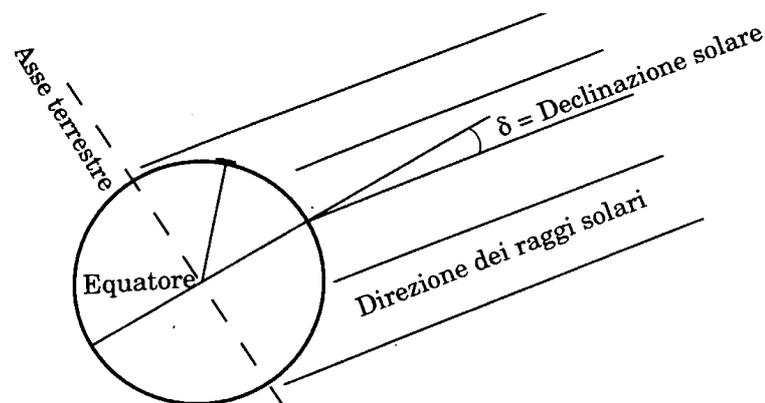


Figura 1.2 - Definizione della declinazione solare. [5]

La posizione istantanea del Sole, definita dall'altezza solare α e dall'azimut solare a , è valutabile per mezzo delle relazioni:

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } L \text{ sen } \delta + \text{cos } L \text{ cos } \delta \text{ cos } h \quad (1.2)$$

$$\text{sen } a = \frac{\text{cos } \delta \cdot \text{sen } h}{\text{cos } \alpha} \quad (1.3)$$

Poiché l'azimut solare può assumere valori maggiori di 90° (in valore assoluto), mentre la funzione arcoseno fornisce per convenzione valori di a compresi tra -90° e $+90^\circ$, è necessario, in questi casi, apporre delle correzioni ai valori calcolati con l'eq. (1.3). La declinazione solare δ può essere calcolata per mezzo della formula approssimata di Cooper: [5]

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[360 \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (1.4)$$

essendo n l'ennesimo giorno dell'anno e 284 il numero corrispondente all'11 ottobre e non al 23 settembre ($\delta(t)$ non è una senoide perfetta per l'ellitticità dell'orbita). [10]

L'angolo orario relativo all'alba h_a o al tramonto h_t può essere calcolato per mezzo dell'equazione (1.2) annullando il $\text{sen} \alpha$:

$$h_a = -h_t = \arccos(-\text{tg}L \cdot \text{tg}\delta)$$

All'equatore ($L=0$), si ottiene $h_a = -h_t = 90^\circ$ e pertanto la durata del giorno è sempre pari a 12 ore; per le altre località ciò si verifica se si annulla la declinazione ($\delta=0$), cioè agli equinozi.

La fig. 1.3 mostra la posizione della Terra rispetto al Sole in corrispondenza degli equinozi e dei solstizi (l'asse polare della Terra forma con la

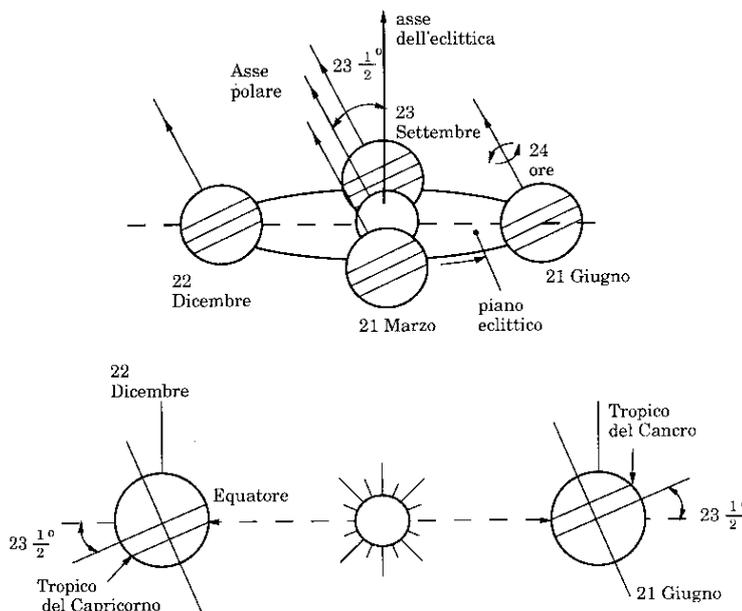


Figura 1.3 - Moto della Terra intorno al Sole. [5]

normale al piano dell'orbita un angolo di $23,45^\circ$). Per calcolare l'angolo orario in una qualunque ora di un giorno particolare è necessario conoscere l'ora di passaggio del Sole sul meridiano locale, che è il mezzogiorno del fuso con due correzioni: differenza di longitudine con il meridiano centrale del fuso orario (+4 minuti/grado ad ovest, -4 ad est) ed **equazione del tempo** (fig. 1.4). Quest'ultima correzione è dovuta alla variazione della velocità orbitale della Terra durante l'anno.

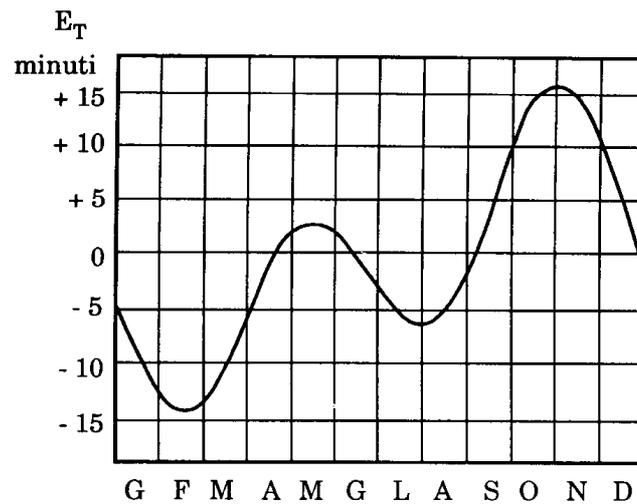


Figura 1.4 - Equazione del tempo durante l'anno. [5]

In definitiva è, per l'angolo orario:

$$h = 15 \cdot (\text{orario del fuso} + E_T + \text{differenza longitudine} - 12^h) \quad (1.5)$$

Naturalmente l'orario convenzionale del fuso è da considerarsi solare (quindi, in periodo di ora legale bisogna sottrarre un'ora). E' il caso di osservare che l'irraggiamento solare negli emisferi sud e nord non è sovrapponibile nelle stesse stagioni: essendo la Terra in perielio (il punto dell'orbita più vicino al Sole) alla fine di dicembre, l'estate dell'emisfero meridionale gode di un irraggiamento maggiore dell'estate dell'emisfero settentrionale (che cade in giugno, quando la Terra è in afelio), e viceversa l'inverno meridionale è un po' più "freddo" di quello settentrionale. La variazione della radiazione extratmosferica dovuta all'ellitticità dell'orbita è stata quantificata in $\pm 3,3\%$ nell'anno intorno al valore della costante solare: al suolo, per quanto appena detto, l'oscillazione è più pronunciata nell'emisfero australe, ma la differenza è confrontabile con altri fattori di incertezza, e non se ne tiene conto nei calcoli.

Quantitativamente, l'irraggiamento extratmosferico è ben approssimato dalla relazione:

$$I_0(t) = I_{cs} \cdot e(t)$$

dove $e(t) = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi n(t)}{365}\right)$, con $n(t)$ numero progressivo del giorno dell'anno.

Al suolo, l'irraggiamento globale I [W/m^2] è la somma dell'irraggiamento diretto normale I_{bn} e dell'irraggiamento diffuso I_d , così definiti:

$$I_{bn} = I_0 \cdot \tau_b$$

con $\tau_b = \frac{\exp(-0,65m_z)}{2} + \frac{\exp(-0,095m_z)}{2}$ (coeff. di trasm. della radiazione diretta);

$m_0 = \text{cosec}\alpha$; α altitudine solare;

$m_z = m_0 \cdot p_z/p_0$ (p pressione atmosferica alla quota z e zero).

$$I_d = I_0 \text{ sen}\alpha \cdot \tau_d$$

con $\tau_d = 0,2710 - 0,2939 \tau_b$ (coeff. di trasm. della radiazione diffusa)².

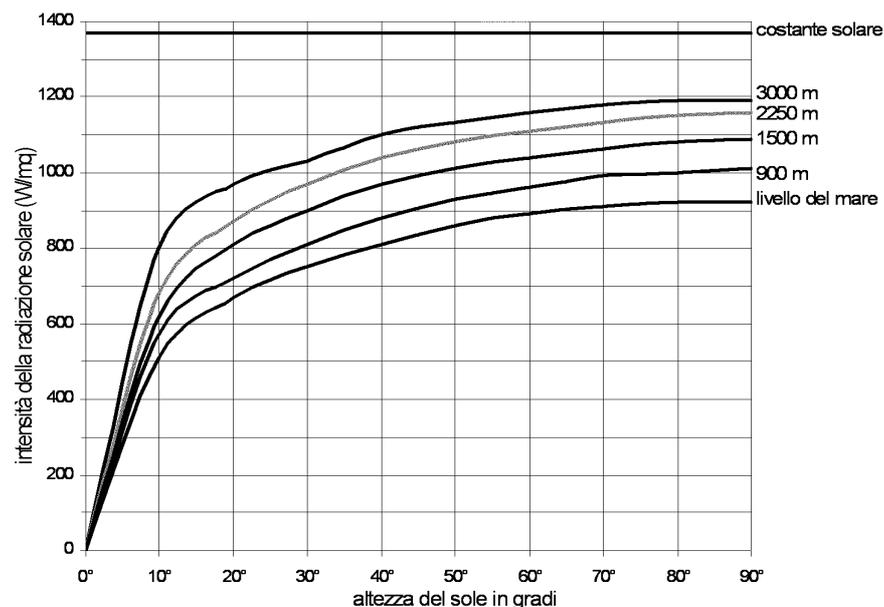


Figura 1.5 - Intensità della radiazione solare al suolo al variare dell'altitudine.

Noti l'angolo d'inclinazione β e l'azimut a_w di una superficie, è possibile calcolare l'**angolo d'incidenza i** dei raggi solari sulla superficie tramite l'espressione:

$$\cos i = \cos(a - a_w) \cos\alpha \text{ sen}\beta + \text{sen}\alpha \cos\beta \quad (1.6)$$

e la radiazione diretta istantanea intercettata dalla superficie:

$$G_b = I_{bn} \cdot \cos i.$$

² Liu-Jordan. (1960)

La radiazione diffusa istantanea ha una componente diretta (dalla volta celeste) pari a:

$$G_{db} = I_d \cdot \cos^2 \frac{\beta}{2}$$

ed una riflessa (dal terreno circostante), a sua volta dotata di componente diretta e diffusa, pari a:

$$G_{dr} = (I_{bn} \sin \alpha + I_d) \cdot \rho \sin^2 \frac{\beta}{2}$$

dove ρ è detta **albedo** o **coefficiente di riflessione** (del terreno o comunque dell'ambiente circostante) (vedi tabella 1.2); altre componenti derivanti da ulteriori riflessioni sono trascurabili.

superficie	ρ
neve (caduta di fresco con un film di ghiaccio)	0.75
superfici d'acqua (ad elevati angoli di incidenza)	0.07
strade sterrate	0.04
foresta di conifere (in inverno)	0.07
foresta in autunno	0.26
cemento	0.22
foglie secche	0.30
erba secca	0.20
erba verde	0.26
superfici di bitume e ghiaia	0.13
superfici di rocce non omogenee	0.20
pareti di edifici scure (mattoni rossi, pitture scure)	0.27
pareti di edifici chiare	0.60
campi innevati con boschi sullo sfondo	0.66 ÷ 0.73
campi innevati (argilla ed erba) presso una strada	0.61 ÷ 0.70
bosco innevato (conifere)	0.61
bosco innevato (deciduo)	0.72

Tabella 1.1 - Valori dell'albedo per alcuni tipi di superficie. [10]

La radiazione globale istantanea incidente su una superficie comunque inclinata è dunque la somma dei tre contributi, cioè:

$$G = I_{bn} \cos i + I_d \cos^2 \frac{\beta}{2} + (I_{bn} \sin \alpha + I_d) \cdot \rho \sin^2 \frac{\beta}{2}. \quad (1.7)$$

I dati più interessanti ai fini del progetto sono però quelli dell'energia incidente; i contributi della radiazione istantanea sono però difficilmente integrabili e fortemente variabili nel tempo: bisogna quindi ricorrere ai dati statistici, numerosi e ben distribuiti sul territorio dei paesi industrializzati. Di questi, i più interessanti sono quelli dell'energia giornaliera media mensile diffusa \bar{D} e dell'energia g.m.m. globale \bar{H} incidenti su superficie orizzontale al suolo: Liu e Jordan hanno scoperto che il loro rapporto è funzione di un parametro detto **indice mensile di serenità \bar{K}** :

$$\frac{\bar{D}}{\bar{H}} = 1,39 - 4,027\bar{K} + 5,531\bar{K}^2 - 3,108\bar{K}^3 \quad (1.8)$$

$$\text{dove} \quad \bar{K} = \frac{\bar{H}}{H_{ex}}$$

Nel calcolo di \bar{H}_{ex} ci si serve di un valore di I_{cs} pari a 1394 W/mq; il suo valore si fa coincidere, mese per mese, con l'effettivo valore di H_{ex} in un giorno in cui si ha $H_{ex} = \bar{H}_{ex}$ (tab. 1.2). L'energia incidente su superficie orizzontale extratmosferica al giorno ennesimo dell'anno è (in Wh/m²):

$$H_{ex} = \frac{24}{\pi} I_{cs} \left[1 + 0,033 \cos \frac{24\pi n}{365} \right] (\cos L \cos \delta \sin h_a + h_a \sin L \sin \delta) \quad (1.9)$$

dove h_a è espresso in radianti.

Mese	Giorni dell'anno	Data	Declinazione
GEN.	17	17 Gennaio	- 20° 55'
FEB.	47	16 Febbraio	- 12° 57'
MAR.	75	16 Marzo	- 2° 25'
APR.	105	15 Aprile	+ 9° 24'
MAG.	135	15 Maggio	+ 18° 47'
GIU.	162	11 Giugno	+ 23° 05'
LUG.	198	17 Luglio	+ 21° 11'
AGO.	228	16 Agosto	+ 13° 27'
SET.	258	15 Settembre	+ 2° 13'
OTT.	288	15 Ottobre	- 9° 36'
NOV.	318	14 Novembre	- 18° 54'
DIC.	344	10 Dicembre	- 23° 03'

Tabella 1.2 – Giorni dell'anno nei quali la declinazione è pari al valore medio mensile.

GENNAIO		FEBBRAIO		MARZO		APRILE		MAGGIO		GIUGNO	
\bar{D}	\bar{H}										
3,0	6,0	4,1	8,9	5,5	13,0	6,9	17,8	7,7	21,9	7,6	25,3
LUGLIO		AGOSTO		SETTEMBRE		OTTOBRE		NOVEMBRE		DICEMBRE	
\bar{D}	\bar{H}										
7,0	26,0	6,5	22,4	5,7	16,8	4,4	11,5	3,2	7,3	2,7	5,5

Tabella 1.3 – Energia solare giornaliera media mensile (diffusa e globale) al suolo a Potenza (MJ/m²). [5]

Valutata tramite \bar{H} e \bar{K} (o ricavata da tabelle) la componente diffusa \bar{D} , l'energia giorn. media mens. diretta al suolo si ricava per differenza: $\bar{B} = \bar{H} - \bar{D}$.

Su una superficie arbitrariamente orientata, l'energia g.m.m. diretta \bar{G}_b è proporzionale ad un coefficiente che è funzione dell'inclinazione β e dell'angolo orario all'alba h'_a della superficie: si noti che su una superficie inclinata non esposta a sud ci possono essere anche due albe e due tramonti al giorno.

$$\bar{G}_b = \left(\frac{\overline{\cos i}}{\overline{\sin \alpha}} \right) \bar{B} = \bar{R}_b \cdot \bar{B} \quad (1.10)$$

Il **fattore di inclinazione** \bar{R}_b ha un'espressione analitica solo per le superfici esposte a sud: per altre esposizioni bisogna ricorrere alle varie tabelle reperibili sulla letteratura specializzata o al calcolo dei valori medi giornalieri mensili degli angoli i ed α . Si ha quindi, per le superfici esposte a sud:

$$\bar{R}_b = \frac{\overline{\cos(L - \beta) \cos \delta \sin h'_a + h'_a \sin(L - \beta) \sin \delta}}{\overline{\cos L \cos \delta \sin h_a + h_a \sin L \sin \delta}} \quad (1.11)$$

Per il calcolo di h'_a occorre calcolare h_a per $\alpha=0^\circ$ e per $i=90^\circ$:

$$|h'_a| = \min |h_a(\alpha = 0), h_a(i = 90^\circ)| \quad (1.12)$$

che per le superfici esposte a sud vale rispettivamente:

$$|h_a(i=90^\circ)| = |-h_t(i=90^\circ)| = \arccos[-\text{tg}(L-\beta) \cdot \text{tg}\delta]$$

$$|h_a(\alpha=0^\circ)| = |-h_t(\alpha=0^\circ)| = \arccos(-\text{tg}L \cdot \text{tg}\delta);$$

il più piccolo valore va inserito nella (1.11). Sono reperibili anche tabelle con i valori di \bar{R}_b (sempre per il caso dell'esposizione a sud) in funzione di L ed $L-\beta$ [5].

In definitiva, l'energia giornaliera media mensile incidente sul pannello è pari a:

$$\bar{G} = \bar{R}_b \cdot \bar{B} + R_d \cdot \bar{D} + R_r \cdot (\bar{B} + \bar{D}) \quad (1.13)$$

dove $R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2}$ e $R_r = \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}$.

1.2 CONVERSIONE IN ENERGIA TERMICA

La radiazione solare incidente può essere utilizzata per riscaldare fluidi (acqua, aria o soluzioni di vario calore specifico) da far circolare in scambiatori di calore o direttamente in tubazioni e corpi radianti posti nei locali da riscaldare, o per far evaporare le sostanze volatili che vengono utilizzate nei cicli di refrigerazione.

I metodi per raccogliere l'energia solare sotto forma di energia termica sono due:

- con concentrazione, mediante specchi o lenti che riflettono la radiazione verso pannelli o caldaie per l'utilizzo diretto dell'acqua calda o per la produzione di vapore da convogliare a turbina;
- senza concentrazione, mediante pannelli applicati o integrati nelle chiusure degli edifici.

In entrambi i casi le superfici possono essere orientabili o no.

Per economicità e semplicità di gestione, soprattutto per le applicazioni su piccola scala, è senz'altro preferibile raccogliere direttamente l'energia solare su pannelli fissi, opportunamente orientati.

Il primo pannello solare pare sia stato costruito nel diciottesimo secolo dallo scienziato svizzero Horace Benedict de Saussure. Si trattava di una semplice "scatola" di legno con un vetro nella parte esposta al sole e la base di colore nero, capace di assorbire la radiazione solare termica intrappolata nella scatola stessa grazie a un locale "effetto serra" e alla scarsa dispersione dovuta alle caratteristiche termiche isolanti del legno. Il pannello consentiva di raggiungere temperature del fluido vettore di circa 87°C. Un nuovo forte impulso allo sviluppo di questa tecnologia fu dato dalla crisi petrolifera agli inizi degli anni '70.

Un sistema solare per la produzione di acqua calda consiste essenzialmente del pannello solare o collettore solare piano, che può essere con vetro (vetrato) o in polipropilene, polietilene, PVC o PDM (non vetrato), di un serbatoio termicamente isolato, destinato all'accumulo dell'acqua calda, di un circuito di collegamento di questi due componenti e dei relativi sistemi di regolazione e controllo. Il problema dell'accumulo dell'energia intrappolata dai pannelli non ha l'unica soluzione del serbatoio coibentato, anche se è la

più pratica e forse l'unica per edifici già esistenti: esempi di altre soluzioni sono esposti al §2.2.

Recenti applicazioni "ibride" riscaldano il fluido vettore utilizzando il retro di pannelli fotovoltaici, ottenendo anche il risultato di abbassare la temperatura di questi ultimi, con beneficio per la loro efficienza.

La circolazione dell'acqua tra il collettore e il serbatoio può avvenire per effetto dell'azione di una pompa (sistemi attivi) o per circolazione naturale, sfruttando le differenze di temperatura del circuito (sistemi passivi o a "termosifone"). Con i pannelli piani senza concentrazione la temperatura massima raggiungibile si aggira intorno agli 80°C e sarà di poco superiore nel caso la base assorbente sia stata trattata con speciali vernici in modo da ottenere una superficie selettiva o anti-raggiante. Temperature più elevate, anche per produrre vapore, possono essere ottenute con tecnologie più sofisticate come quella dei collettori solari con tubi sottovuoto o con piastre che sfruttano il principio della "Non Imaging Optics", che consente di realizzare una debole concentrazione. Nei paesi dove non ci sono problemi di congelamento dell'acqua, si tende ad avere il serbatoio di accumulo integrato nello stesso collettore, con una notevole semplificazione e riduzione dei costi di tutto il sistema. I sistemi più sofisticati sono in genere utilizzati nei paesi più freddi o per utenze che richiedono calore a temperature elevate, quali quelle di tipo ospedaliero per la sterilizzazione o quelle industriali.

La vita di uno scaldacqua solare in commercio si può indicare in 15-20 anni, con costi di manutenzione annuali dell'ordine del 2% del costo iniziale dell'impianto; sistemi solari per scaldare l'acqua sono in genere utilizzati per gli usi domestici di singole famiglie. Si tratta di impianti di 4-6 m², con serbatoio di 150-300 litri, che consentono di produrre acqua calda a temperature non elevate (55°-65°C), tuttavia adatte agli usi di cucina, bagni, riscaldamento. L'energia disponibile alle utenze nelle 24 ore è dell'ordine di 1,5÷3,5 kWh per mq di collettore, rispettivamente in inverno e in estate alle nostre latitudini e con cielo sereno. Gli impianti comprendono un riscaldatore tradizionale integrativo, per i giorni a minore insolazione, della potenza di 1-2 kW, alimentato ad energia elettrica o a gas. Quantificando i vantaggi di un impianto solare, 4 m² di pannelli solari termici per il consumo di una famiglia tipo di 4 persone, abitante in una

località dell'Italia centrale, ($\bar{H} = 4,6 \text{ kWh/m}^2$) consentono, rispetto a uno scaldacqua elettrico o a metano i seguenti risparmi e riduzioni di emissioni:

RISPARMI E RIDUZIONI	SCALDABAGNO ELETTRICO	SCALDABAGNO A METANO
Risparmio in elettricità o gas	2.800 kWh/anno	350 m ³ /anno
Risparmio economico	600.000 lire/anno	370.000 lire/anno
Riduzione emissioni	2,56 ton. di CO ₂ /anno	2,066 ton. di CO ₂ /anno

Negli ultimi decenni sono stati installati nel mondo circa 30M di metri quadrati di pannelli solari, di cui 5.600.000 in Europa: il 40% del mercato mondiale dei collettori solari è nei paesi europei e del mediterraneo. In quelli europei è più sviluppato nei paesi a minore insolazione, come l'Austria, la Danimarca, la Svezia e la Germania, che in Italia, Spagna e Francia, caratterizzati da una buona insolazione: tale contraddizione deriva in particolare dalla diversa sensibilità ambientale, che ha costituito un importante fattore di stimolo all'adozione di specifiche politiche industriali per lo sviluppo del solare nei paesi del Nord Europa.

L'Unione Europea sovvenziona l'installazione di alcune migliaia di scaldacqua solari in nuovi complessi residenziali di medie e grandi dimensioni con lo scopo di dimostrare la possibilità di ridurre i costi degli stessi attraverso interventi su larga scala; la disponibilità di nuove tecnologie per la costruzione di edifici (per esempio i nuovi materiali isolanti trasparenti alla luce) sta aprendo la strada all'utilizzo di pannelli solari nella climatizzazione invernale e estiva di abitazioni e edifici. Nel §6.1 sono descritte alcune esperienze che hanno dato risultati oltre le migliori aspettative.

La diffusione dei sistemi solari per l'acqua calda è tuttavia oggi significativa solo in pochi paesi del mondo, quali Israele, Cipro, Grecia e Giordania, dove sono installati più di 100 m² di collettori solari ogni 1000 abitanti (in Italia sono installati 3 m² per ogni 1000 abitanti). In Europa il mercato dei collettori solari si è sviluppato a partire dal 1989 a un tasso del 18% e, in base agli obiettivi proposti dall'European Solar Industry Federation (ESIF), potrebbe crescere nei prossimi anni del 23% per poi arrivare, nel 2005, alla produzione e alla vendita annuale di oltre 5M di m² di pannelli. Nel 1994 4.400.000 m² di pannelli vetrati e 1.200.000 m² di pannelli non vetrati hanno consentito

nel nostro continente di produrre 2,6 TWh, e di evitare l'immissione nell'atmosfera di 1,8 milioni di tonnellate di CO₂.

Purtroppo, la carenza di un quadro normativo organico a livello europeo e la stessa complessità e costosità delle procedure di certificazione creano dei gravi ostacoli al commercio continentale di questi prodotti: su proposta dell'ESIF (European Solar Industry Federation) è stato creato l'European Standards Technical Committee CEN/TC 312 nell'ambito del programma comunitario Altener, con lo scopo di stabilire (si prevede entro il 1998) degli standards europei di riferimento che consentano di assicurare la qualità dei prodotti e dei servizi post-vendita.

Per quanto riguarda l'Italia, le previsioni dell'ESIF al 2005 indicano in 205.000 m² il totale dei collettori installati a quella data contro gli attuali 176.000 m² (con 4 m² di pannelli per 1000 abitanti). Le prime ricerche sistematiche per il riscaldamento solare dell'acqua furono effettuate in Italia agli inizi degli anni '60 dal Politecnico di Milano nell'ambito di un programma finanziato dal CNR, che comprendeva la sperimentazione di diverse tipologie di impianto a Cortina d'Ampezzo. Attualmente, di particolare interesse è il programma varato dal Comune di Palermo relativo all'installazione di impianti solari per acqua calda e fotovoltaici nelle strutture pubbliche cittadine.

1.3 CONVERSIONE IN ENERGIA ELETTRICA

Qualunque radiazione elettromagnetica è composta di fotoni, particelle elementari elettricamente neutre dalla doppia natura materiale e ondulatoria: a seconda della lunghezza d'onda della radiazione si ottengono onde radio (λ dell'ordine di parecchi metri), onde televisive, microonde, luce, ultravioletti, raggi X e raggi γ (λ dell'ordine dei raggi atomici).

La tecnologia fotovoltaica (FV) consente di trasformare direttamente l'energia associata alla radiazione solare in energia elettrica. Essa sfrutta il cosiddetto **effetto fotovoltaico** che è basato sulle proprietà di alcuni materiali semiconduttori (fra cui il silicio, elemento molto diffuso in natura) che, opportunamente trattati ed interfacciati, sono in grado di generare elettricità se colpiti dalla radiazione solare, senza quindi l'uso di alcun combustibile.

Il dispositivo più elementare capace di operare una tale conversione è la cella fotovoltaica: un modulo fotovoltaico tipo, formato da 36 celle, ha una superficie di circa mezzo metro quadrato ed eroga, in condizioni ottimali, circa 50W. Un metro quadrato di moduli produce una energia media giornaliera tra 0,4 e 0,6 kWh, in funzione dell'efficienza di conversione e dell'intensità della radiazione solare. Un insieme di moduli, connessi elettricamente tra loro, costituisce il campo FV che, insieme ad altri componenti meccanici, elettrici ed elettronici, consente di realizzare i sistemi FV.

Il sistema FV, nel suo insieme, capta e trasforma l'energia solare disponibile e la rende utilizzabile per l'utenza sotto forma di energia elettrica. La sua struttura può essere molto varia a seconda del tipo di applicazione. Una prima distinzione può essere fatta tra sistemi isolati (*stand-alone*) e sistemi collegati alla rete (*grid connected*). Nei sistemi isolati, in cui la sola energia è quella prodotta dal FV, occorre prevedere un sistema di accumulo (in genere costituito da batterie simili a quelle utilizzate per le auto e dal relativo apparecchio di controllo e regolazione della carica) che è reso necessario dal fatto che il generatore FV può fornire energia solo nelle ore diurne, mentre spesso la richiesta maggiore si ha durante le ore serali (illuminazione o apparecchi radio-TV). E' opportuno prevedere quindi un dimensionamento del campo FV in grado di permettere, durante le ore di insolazione, sia l'alimentazione del carico, sia la ricarica delle batterie di accumulo. Poiché l'energia prodotta dal generatore FV è sotto forma di **corrente continua** (CC), qualora si debbano alimentare apparecchi che funzionino con **corrente alternata** (CA), è necessario introdurre nel sistema un dispositivo elettronico, detto **inverter**, che provvede alla conversione da CC a CA. Nei sistemi collegati alla rete l'inverter è sempre presente mentre, al contrario degli impianti *stand-alone*, non è previsto il sistema di accumulo in quanto l'energia prodotta durante le ore di insolazione viene immessa nella rete; viceversa, nelle ore notturne il carico locale viene alimentato dalla rete: un **meter** provvede a scalare la differenza dal contatore.

Un sistema di questo tipo è, sotto il punto di vista della continuità di servizio, più affidabile di un sistema isolato. Quest'ultimo può tuttavia essere integrato con una fonte tradizionale, come, ad esempio, il diesel (sistema ibrido diesel-FV), o innovativa come le **celle a combustibile** (ciclo dell'idrogeno da elettrolisi, vedi §3.4). I sistemi FV offrono grandi vantaggi ambientali, in quanto non producono emissioni chimiche,

termiche o acustiche. Essi, inoltre, non hanno parti in movimento e sono, quindi, affidabili e a bassa manutenzione.

Un piccolo sistema isolato FV ha il vantaggio di produrre energia elettrica esattamente dove serve e nella quantità vicina alla effettiva domanda. Gli impianti isolati vengono utilizzati per diverse applicazioni sia nel settore residenziale che in quello industriale o agricolo-turistico. Un impianto FV inferiore a 1 kW può, ad esempio, far funzionare gli apparecchi elettrici (lampade, televisore, frigorifero) di una normale abitazione lontana dalla rete. In Italia esistono oltre 5.000 impianti FV per l'elettificazione (illuminazione, alimentazione elettrodomestici, pompaggio dell'acqua) di case rurali isolate e rifugi di montagna. Un generatore FV, con una gamma di potenze molto variabile è in grado di alimentare un sistema di pompaggio; il vantaggio dell'utilizzo di una pompa solare sta nel fatto che in genere la massima richiesta d'acqua coincide con il periodo dell'anno di maggiore insolazione; inoltre è semplice creare riserve idriche, in appositi bacini, che possono così evitare costosi sistemi di accumulo elettrico (sistema ibrido fotovoltaico-idroelettrico). In tab. 1.4 sono elencate alcune applicazioni su grande scala e relative potenze in kiloWatt di punta.

IMPIANTO	POTENZA (kW _p)	APPLICAZIONE
SERRE (SA)	3.300	Rete
VASTO (CH)	1.000	Rete
DELPHOS (FG)	600	Rete
CARLOFORTE (CA)	600 (+900kW eolico)	Rete
LAMEZIA TERME (CZ)	600 (+600kW eolico)	Rete
SALVE (LE)	600 (+600kW eolico)	Rete
CASACCIA (RM)	100	Rete
ALTA NURRA (SS)	100	Rete
LAMPEDUSA	100	Dissalatore
LIPARI	100	Dissalatore
NETTUNO (RM)	100	Alimentazione villaggio
VULCANO	80	Rete locale
ZAMBELLI (VR)	70	Pompaggio
TREMITI	65	Dissalatore
GIGLIO	45	Refrigerazione
CETONA/SOVANA (SI)	20+6	Sito archeologico

Tabella 1.4 – I principali impianti di produzione di energia alternativa in Italia (aggiorn. 1995)

L'illuminazione stradale di aree non collegate alla rete elettrica è un'altra applicazione che può risultare economicamente vantaggiosa. Una semplice applicazione è la ricarica delle batterie di servizio per auto, caravan e imbarcazioni in aree di campeggio o porticcioli turistici.

Tra le applicazioni definite industriali, si può annoverare, come una delle applicazioni di maggior successo e affidabilità del FV, l'alimentazione di stazioni per le telecomunicazioni (ponti radio per telefonia e ripetitori TV). Il FV si è confermato un'ottima soluzione anche per sistemi di segnalazione del traffico ferroviario, aereo e marittimo e per le stazioni di monitoraggio ambientale, quasi sempre situate in località isolate. Altri utilizzi del FV sono: sistemi di refrigerazione, soprattutto per vaccini, in centri medici rurali, impianti di protezione catodica (per tubazioni collocate in terreni aggressivi) e impianti di dissalazione (vedi tabella 1.4).

Il fotovoltaico appare, almeno nel lungo periodo, tra le più promettenti tecnologie "rinnovabili" in grado di produrre energia elettrica su grande scala, soprattutto in Italia dove i livelli di insolazione (e la dipendenza dall'estero per gli approvvigionamenti di combustibili) sono elevati. Il Piano Energetico Nazionale (PEN) del 1988, nell'intento di diversificare le fonti di produzione e di ridurre la percentuale di energia importata, attribuiva al FV un ruolo rilevante nell'ambito delle fonti rinnovabili definendo diverse azioni per il suo sviluppo. Dal punto di vista tecnologico il programma prevedeva, da una parte la messa a punto del processo di produzione del silicio "di grado solare" (meno puro di quello destinato all'industria elettronica e dagli scarti di questo derivato) e della relativa tecnologia di fabbricazione delle celle; dall'altra lo sviluppo della tecnologia delle *celle a film sottile* (vedi §3.2). Per quanto riguarda le applicazioni energetiche dei sistemi FV, all'inizio del 1995 risultavano installati sul nostro territorio ben 14 MW, che pongono l'Italia al primo posto tra i paesi europei.

POTENZA FV INSTALLATA IN ITALIA (al 1995)

APPLICAZIONE	POTENZA (kWh)
Residenziale	4.350
Non domestiche	4.250
Impianti pilota collegati in rete	5.480
TOTALE	14.080

I principali operatori del settore sono l'Università, l'ENEA (che svolge ricerca sia sui materiali che sui sistemi), l'ENEL (ricerca sui sistemi ed applicazioni su larga scala) e l'industria, con tre operatori principali: EUROSOLARE, ANIT e HELIOS Technology. La prima, società del gruppo ENI, realizza l'intero ciclo di produzione, dalla lavorazione del silicio ai sistemi, con una capacità annua di circa 2,5 MW/turno; l'ANIT ha maturato buone esperienze nel campo della ingegnerizzazione e commercializzazione di sistemi di ogni dimensione; la HELIOS, infine, produce moduli e sistemi. Sono inoltre presenti sul mercato rivenditori di moduli di produzione estera nonché varie piccole imprese che assemblano sistemi, in genere di piccola taglia, per le applicazioni più diffuse. Al fine di incoraggiare ed accelerare la diffusione del FV (e delle altre fonti di energia rinnovabile) è in vigore, e *potenzialmente* operante, in Italia, un sistema di regolamenti e sussidi (vedi §5.2).

La produzione degli impianti FV attualmente installati in Italia è stimabile in 15÷20 milioni di kWh/anno. La produzione di energia è uguale alla potenza dell'impianto per le ore "equivalenti" del suo sfruttamento (dipendenti dal sito): Produciibilità (kWh/anno)= Potenza · ore-equivalenti (kW · 1500÷2000 h/anno, circa 5 h/giorno).

COSTO kW INSTALLATO PER DIVERSE TIPOLOGIE DI SISTEMI FV (al 1995)

TIPO DI IMPIANTO	MILIONI DI LIRE/kW
Impianti isolati di piccola taglia	25-40
Impianti di piccola taglia collegati alla rete	15-20
Centrali di media taglia	12-16
Centrali di grande taglia	12-14

COSTO ENERGIA PRODOTTA (al 1995)

TIPO DI IMPIANTO	LIRE/kWh
Impianti isolati di piccola taglia	1500-2400
Impianti di piccola taglia collegati alla rete	920-1200
Centrali di media taglia	730- 970
Centrali di grande taglia	730- 850

AMMORTAMENTO 8% IN 25 ANNI; ESERCIZIO E MANUTENZIONE 1% DEL CAPITALE; 1700 ORE EQUIVALENTI

L'area occupata dai moduli FV di un impianto isolato da 1 kW è circa 10 m²: stabilito in 2500-5000 kWh il consumo tipico di una famiglia di 4 persone in un anno, l'area di un generatore FV che può soddisfare la domanda di questa famiglia tipo è di circa 15-30 m² in una località dell'Italia meridionale.

Volendo centralizzare l'impianto, una centrale di 1 MW può fornire l'energia necessaria a soddisfare la domanda di circa 1000 utenti: l'area occupata è di circa 2 ettari (20.000 m²). L'impegno del territorio è dovuto per il 50% alle aree occupate dai moduli e dalle parti del sistema, e per l'altro 50% alle aree "di rispetto", di fatto libere, ma necessarie per evitare l'ombreggiamento reciproco delle file di moduli.

Al capitolo 5 sono confrontate le varie soluzioni.

Gli esperti concordano sul fatto che la sorte "finale" del fotovoltaico (e in generale delle rinnovabili) si giocherà su tempi lunghi in tutto il mondo (ma particolarmente nei paesi sviluppati che sono i più energivori) su uno scacchiere che dovrà necessariamente considerare la necessità di salvaguardia dell'ambiente insieme al progressivo impoverimento delle risorse di combustibili fossili. Dal punto di vista della tecnologia, è opinione diffusa che nei prossimi anni, a livello di produzione industriale, continuerà a regnare la tecnologia del silicio cristallino. Pertanto gli sforzi di ricerca e sviluppo su di essa continuano al fine di facilitare la sempre maggiore diffusione del FV consentendo allo stesso tempo la redditività delle industrie. Un contributo essenziale al raggiungimento della economicità dell'energia da FV deve essere dato dalle azioni sui componenti non FV del sistema (il cosiddetto BOS – Balance of System): ciò è particolarmente vero per la tecnologia del silicio cristallino che ha dei limiti intrinseci di costi raggiungibili (circa 2-3 \$/W).

In questo settore è indispensabile il contributo delle società elettriche, che purtroppo in Italia è ancora sotto la sufficienza.

Per quanto riguarda la ricerca sulla tecnologia del futuro sembra plausibile che essa possa essere basata sui film sottili: l'efficienza delle celle al silicio amorfo è ormai giunta, negli USA, fino al 12% contro il 18% del silicio cristallino (l'ENEA di Portici ha realizzato il record europeo con il 9,1%), e promettenti risultati sono stati ottenuti, a livello di laboratorio, su vari tipi di composti (diseleniuro di indio e rame, tellururo di cadmio, ecc.). Lo sviluppo industriale dei film sottili è comunque un obiettivo di medio-lungo termine che coinvolge anche problemi di organizzazione, gestione e finanziamento di ricerca finalizzata da condurre su appropriata scala mediante collaborazione fra centri di ricerca universitari, governativi ed industriali.