

# La **radiazione solare** al suolo

**IL SECONDO DI UNA SERIE DI ARTICOLI SUL MONDO DELL'ENERGIA FOTOVOLTAICA: IN QUESTO NUMERO, LE COMPONENTI E IL CALCOLO DELLA RADIAZIONE SOLARE AL SUOLO**

di **FRANCESCO GROPPI**

**I**l riscaldamento superficiale del nostro Pianeta, che ha permesso il formarsi e il progredire della vita su di esso, e che d'altronde è all'origine del manifestarsi dei fenomeni atmosferici, deriva dall'energia ceduta dal sole alla terra.

Il globo terrestre intercetta l'energia che si propaga dal sole in modo continuo sulla superficie che di volta in volta risulta esposta alla radiazione solare.

Tuttavia, se consideriamo la rotazione della terra sul proprio asse, l'inclinazione di quest'ultimo rispetto al piano su cui avviene il moto di rivoluzione, la dipendenza dalla latitudine e infine i fenomeni atmosferici che tendono a filtrare in misura diversa la radiazione solare, troviamo delle differenze evidenti a seconda della zona e del periodo considerato. La radiazione solare al suolo non risulta quindi essere uniformemente distribuita e questo fattore influisce in modo determinante sui fenomeni atmosferici che continuamente prendono vita nelle diverse zone del nostro Pianeta.

L'energia irradiata dal sole deriva dai processi di fusione dell'idrogeno contenuto al suo interno. Essa si propaga per irraggiamento nello spazio fi-

no a raggiungere la fascia esterna dell'atmosfera terrestre.

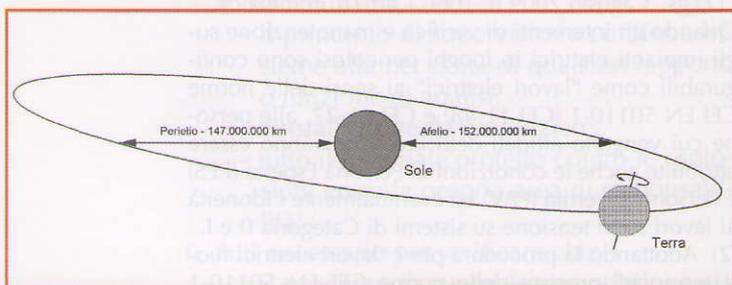
Nel sole, la fotosfera costituisce lo strato esterno della zona convettiva ed è la sorgente della maggior parte della radiazione. L'irraggiamento complessivo solare a livello della fotosfera è pari a circa 63.000 kW/m<sup>2</sup>, con una temperatura equivalente di 5779 K.

Questo valore di potenza specifica decresce geometricamente con la distanza e, in pratica, dopo avere percorso i 149,5 milioni di km (±1,7%) che separano la terra dal sole, assume un valore molto più ridotto. Infatti, all'esterno dell'atmosfera terrestre, alla radiazione solare è associata una potenza complessiva pari a 1367 W/m<sup>2</sup>, chiamata costante solare.

Come si può vedere in figura 1, la terra ruota attorno al sole con un movimento detto di rivoluzione e, nel contempo, ruota su se stessa. Compiendo il moto di rivoluzione, la terra descrive attorno al sole un'orbita ellittica e quindi la distanza tra due corpi celesti varia periodicamente nel corso dell'anno tra due valori estremi corrispondenti ai punti di afelio e perielio. Per questo motivo, la costante solare rappresenta il valore medio della potenza specifica, la quale in realtà oscilla entro un intervallo del ±3%, con valore massimo nel periodo invernale e minimo nella stagione estiva.

Come sappiamo, il moto di rivoluzione della terra attorno al sole è di 365 giorni e 6 ore, mentre quello di rotazione della terra su se stessa è molto più veloce e si compie in 24 ore.

L'asse di rotazione terrestre inoltre, non è perpendicolare al piano di rivoluzione, ma risulta essere inclinato di 23,45°. Per questo motivo i



▲ **Figura 1:** Rotazione della terra attorno al sole e attorno al proprio asse

due emisferi terrestri sono irraggiati diversamente dal sole nel corso dell'anno, originando così un fenomeno ciclico che dà luogo all'alternarsi delle stagioni.

## COMPONENTI DELLA RADIAZIONE SOLARE AL SUOLO

A causa dei fenomeni di assorbimento e diffusione che hanno luogo nell'atmosfera, al livello del suolo, l'energia specifica è minore di quella misurata al di fuori dell'atmosfera terrestre. Una parte dell'energia solare risulta infatti riflessa nello spazio, mentre una frazione di quella restante viene poi assorbita dall'atmosfera. Le relative proporzioni tra le diverse destinazioni della radiazione solare sono influenzate dalle condizioni meteorologiche locali e, come noto, possono subire ampie variazioni.

Oltretutto, parte della radiazione solare che percorre l'atmosfera terrestre subisce un processo di diffusione che tende a distribuirsi in direzioni differenti.

Dal punto di vista di un osservatore al suolo, questo fenomeno produce la scomposizione della radiazione solare in una componente diretta, proveniente direttamente dal disco solare, e in una diffusa, che invece proviene dalla porzione di cielo visibile dal punto di osservazione, come schematizzato in figura 2.

Se l'osservatore non è contornato da ostacoli di dimensione significativa, la radiazione diffusa proviene dalla semisfera sovrastante, la quale risulta in pratica delimitata dall'orizzonte.

In genere, nei calcoli si considera per la radiazione diffusa una distribuzione di tipo uniforme su tutta la semisfera visibile dall'osservatore. Tuttavia, nella realtà, la posizione del sole, associata alla dislocazione e alla forma delle eventuali nubi presenti in cielo fanno sì che questa ipotesi risulti non sempre confermata.

L'osservatore al suolo può inoltre percepire una terza componente della radiazione solare, la quale invece è riflessa dal suolo o dagli oggetti circostanti. Questa componente, chiamata riflessa o di albedo, è in genere molto minore delle prime due, ma in qualche caso, ad esempio in presenza di specchi d'acqua o di superfici innevate o ghiacciate, può assumere valori rilevanti.

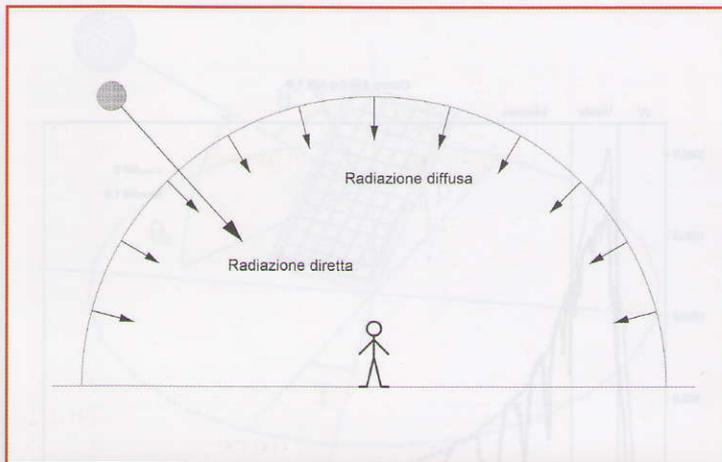
Molto semplicemente, si può allora affermare che la radiazione solare  $G$  intercettata da un oggetto o da una superficie nell'atmosfera terrestre può essere considerata la somma della componente diretta  $G_B$ , di quella diffusa  $G_D$  e di quella riflessa  $R$ , ossia:

$$G = G_B + G_D + RG$$

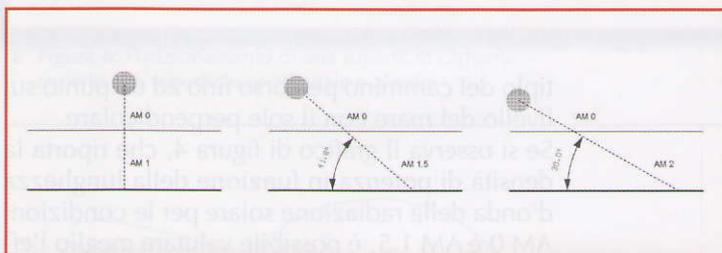
## COMPOSIZIONE SPETTRALE DELLA RADIAZIONE SOLARE

La radiazione solare è composta da radiazioni elettromagnetiche di lunghezza d'onda e inten-

▼ **Figura 2:** Rappresentazione schematica delle componenti diretta e diffusa della radiazione solare



▼ **Figura 3:** Esempio di differenti percorsi di attraversamento dell'atmosfera da parte della radiazione solare



sità differenti e che all'incirca corrispondono all'irraggiamento che produce un corpo portato alla temperatura di 6000 °C. Tale è infatti, approssimativamente, la temperatura della fotosfera che, come si è visto, è responsabile della maggior parte dell'emissione energetica del sole.

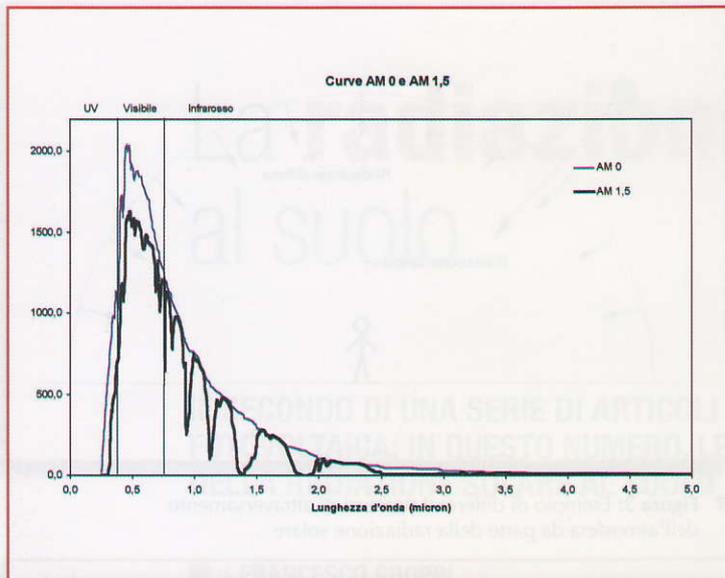
Si è anche visto che il passaggio della radiazione solare attraverso l'atmosfera terrestre ne modifica l'intensità al suolo a causa di numerosi fattori, tra cui in primo luogo le condizioni meteorologiche locali.

La composizione spettrale della radiazione solare risulta però anch'essa modificata a causa dell'attraversamento dell'atmosfera terrestre in quanto le sostanze che la compongono assorbono in modo differente le diverse lunghezze d'onda.

Inoltre, l'attraversamento dell'atmosfera da parte della radiazione solare può produrre effetti diversi a seconda dell'inclinazione del sole rispetto al piano orizzontale. Con riferimento alla figura 3, si può vedere che, se consideriamo per semplicità l'atmosfera omogenea e di altezza uniforme, il percorso solare che la attraversa può essere unitario se il sole è allo zenit (AM 1), oppure può percorrere dei tratti più lunghi. Questi, per fare un esempio, possono essere pari a 1,5 volte il percorso unitario (AM 1.5) o il doppio dello stesso (AM 2).

Più precisamente, la norma CEI EN 60904-3 definisce la massa d'aria AM come la lunghezza del cammino percorso dal raggio solare diretto attraverso l'atmosfera terrestre, espressa come mul-

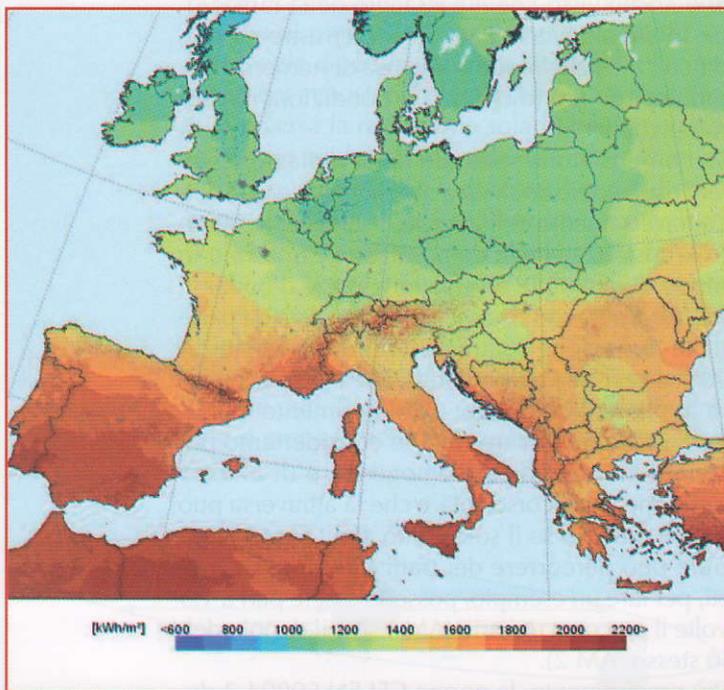
▼ **Figura 4:** Intensità della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda per le condizioni AM 0 e AM 1.5



tiplo del cammino percorso fino ad un punto sul livello del mare con il sole perpendicolare

Se si osserva il grafico di figura 4, che riporta la densità di potenza in funzione della lunghezza d'onda della radiazione solare per le condizioni AM 0 e AM 1.5, è possibile valutare meglio l'effetto dell'attraversamento dell'atmosfera terrestre, evidenziando le zone in cui l'assorbimento risulta maggiore.

Nella pratica impiantistica di progettazione, soprattutto per gli impianti fotovoltaici, il valore di radiazione massima al suolo viene assunto pari a  $1000 \text{ W/m}^2$ , mentre la radiazione spettrale si



▲ **Figura 5:** Mappa europea della radiazione solare. Per ogni sito, l'inclinazione della superficie di riferimento è stato scelto tale da massimizzare l'energia ottenibile

riferisce all'attraversamento AM 1.5 con prefissate condizioni di temperatura e pressione atmosferica. La misura della radiazione solare globale orizzontale si effettua mediante uno strumento detto piranometro o, più comunemente, solarimetro.

## ■ LA RADIAZIONE SOLARE MISURATA AL SUOLO

L'esperienza comune insegna che esistono località particolarmente fortunate dal punto di vista della radiazione solare e altre nelle quali, invece, il sole tende a scarseggiare.

I principali fattori che influiscono sulla quantità di radiazione solare che è possibile ricavare da un dato sito sono la latitudine e le condizioni meteorologiche locali, in particolare la nuvolosità e le precipitazioni. Tuttavia, anche altri fattori, quali ad esempio la presenza di inquinanti atmosferici, possono modificare localmente i dati radiativi.

A titolo di esempio la figura 5 mostra una mappa europea che riporta la radiazione solare annua che è possibile intercettare per mezzo di una superficie inclinata in modo ottimale. La mappa è stata realizzata per gli impianti fotovoltaici ma il suo utilizzo può essere esteso anche ad altre tipologie di sistemi di conversione dell'energia solare.

I dati di radiazione solare sono normalmente espressi in  $\text{kWh/m}^2$  o in  $\text{MJ/m}^2$  e possono riferirsi al giorno o all'anno. Nella figura 5 ad esempio i valori riportati sono chiaramente riferiti al periodo di un anno. In altri casi invece, soprattutto quando i dati sono suddivisi su base mensile, si preferisce considerare la radiazione solare giornaliera.

La rappresentazione grafica della radiazione solare permette di effettuare facilmente dei confronti tra siti diversi, ma quando occorre effettuare dei calcoli la rappresentazione tabulare si rivela più utile.

## ■ RICHIAMI DI GEOMETRIA SOLARE

Un impianto solare, sia esso di tipo fotovoltaico o termodinamico, intercetta quanta più energia possibile per mezzo di opportuni componenti che possono essere pannelli solari, sistemi a specchi o concentratori lenticolari.

Questi componenti possono essere fissi o mobili. Nel primo caso hanno un orientamento pre-stabilito, determinato una volta per tutte in fase di progetto. Nel secondo caso, invece, sono mossi da opportuni meccanismi di puntamento che permettono di orientarli nella direzione del sole. Risulta importante allora individuare una serie di relazioni geometriche che permettano di ricavare la posizione relativa tra il sole e gli elementi in grado di convertire la radiazione solare in energia.

La figura 6 mostra il posizionamento di una superficie captante (nell'esempio rappresentata da

un modulo fotovoltaico) rispetto al piano orizzontale e al disco solare.

Si può notare l'angolo di inclinazione  $\beta$  rispetto all'orizzontale e l'orientamento azimutale  $\gamma$  rispetto all'asse Nord-sud.

Nella figura 6 si può notare anche la presenza di due angoli formati dalla congiungente terra-sole. L'angolo  $\theta_h$  è chiamato altezza solare ed è formato dalla congiungente tra disco solare e punto considerato col piano orizzontale. L'angolo  $\theta$  è invece formato dalla stessa congiungente con la normale alla superficie.

Ovviamente un valore di  $90^\circ$  per  $\theta_h$  significa che nel punto considerato il sole è allo zenit, mentre un angolo  $\theta$  pari a  $0^\circ$  implica che il sole è perpendicolare alla superficie captante.

Occorre poi tenere conto della posizione relativa del sole rispetto al globo terrestre che, come si è visto varia continuamente per effetto dei moti di rotazione e di rivoluzione della terra.

La figura 7 mostra che, rispetto ad un osservatore terrestre, il sole si sposta seguendo un angolo orario  $\omega$  e forma, rispetto al piano equatoriale, un angolo  $\delta$  che prende il nome di declinazione solare.

L'angolo orario  $\omega$  è pari a  $0^\circ$  in corrispondenza del mezzogiorno solare, ossia le ore 12 quando la località è centrata sul meridiano corrispondente. Aumenta di  $15^\circ$  ogni ora che passa o, viceversa, diminuisce di  $15^\circ$  per ogni ora che manca alle 12.

Se la località, come spesso avviene, non si trova su un meridiano corrispondente ad una data ora, occorre correggere il valore tenendo conto che ad ogni grado di longitudine in più (sono positivi i valori verso est) corrispondono 4 minuti in più di differenza. Quest'ultimo scostamento è nel seguito indicato con  $\Delta\omega$ .

In definitiva, l'angolo orario  $\omega$  può essere espresso con buona approssimazione come:

$$\omega = 15 \cdot t + \Delta\omega \quad 180$$

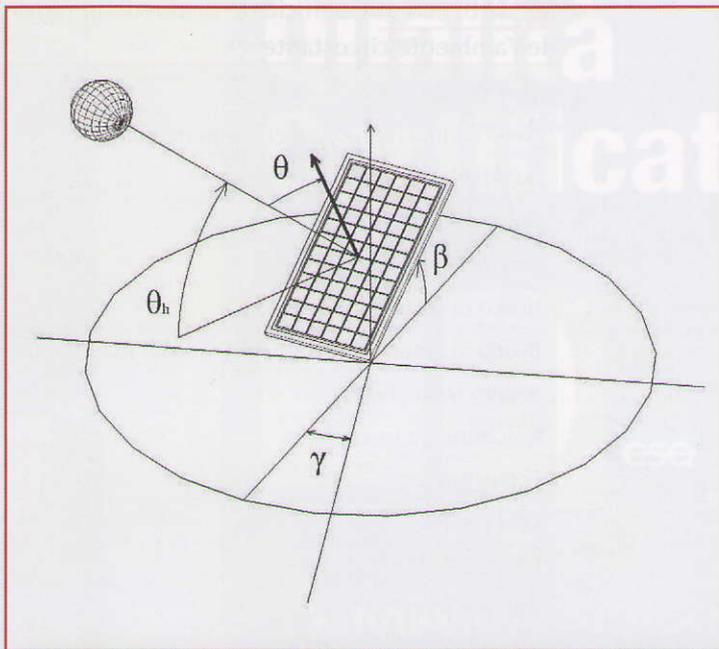
La declinazione  $\delta$ , essendo invece associata alla posizione dell'asse terrestre rispetto al sole durante il moto di rivoluzione, subisce delle variazioni molto più lente. Il calcolo può essere effettuato mediante la formula seguente:

$$\delta = 23,5 \cdot \sin 360 \cdot \frac{284 + n}{365}$$

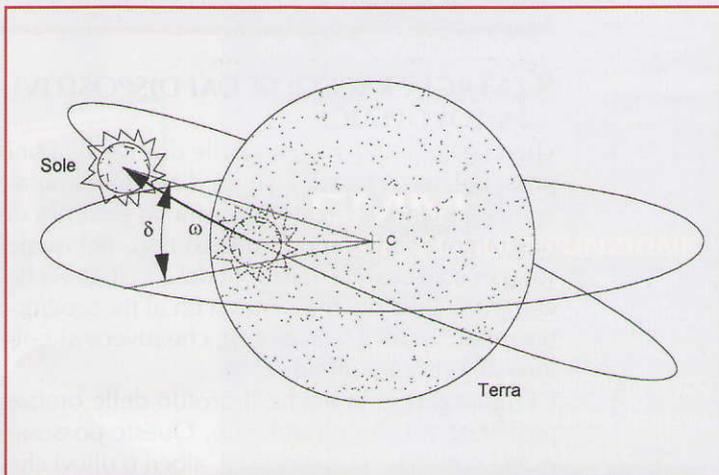
dove  $n$  è il giorno dell'anno conteggiato a partire dal 1° gennaio. Ad esempio, la declinazione  $\delta$  corrispondente al 15 aprile è pari a:

$$\delta = 23,5 \times \sin [360 \times (284+90+15) / 365] = 9,43^\circ$$

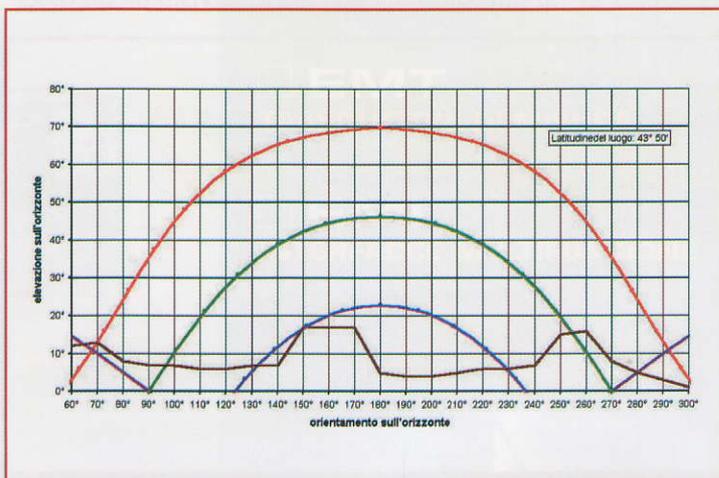
Infine, il calcolo degli angoli  $\theta$  e  $\theta_h$  fa uso di formule piuttosto complesse, le quali però vengono utilizzate nei programmi di simulazione per calcolare la radiazione diretta.



▲ Figura 6: Posizionamento di una superficie captante rispetto alla superficie orizzontale e al sole



▲ Figura 7: Movimento relativo del disco solare rispetto al globo terrestre con evidenziati l'angolo orario  $\omega$  e la declinazione  $\delta$



▲ Figura 8: Esempio di diagramma dei percorsi solari con evidenziato il profilo delle ombre proiettate sul sito considerato

**TABELLA 1:** Coefficiente di albedo in funzione dell'ambiente circostante

Tipo di superficie	$\rho$
Neve caduta di fresco o con film di ghiaccio	0,75
Superfici acquose	0,70
Suolo (creta, marne)	0,14
Strade sterrate	0,04
Bosco di conifere d'inverno	0,07
Bosco in autunno / campi con raccolti maturi e piante	0,26
Asfalto invecchiato	0,10
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Foglie morte	0,30
Erba secca	0,20
Erba verde	0,26
Tetti o terrazzi in bitume	0,13
Pietrisco	0,20
Superfici scure di edifici (mattoni scuri, vernici scure)	0,27
Superfici chiare di edifici (mattoni chiari, vernici chiare)	0,60

### ENERGIA RACCOLTA DAI DISPOSITIVI FOTOVOLTAICI

I percorsi giornalieri solari nelle diverse stagioni possono essere tracciati su un diagramma polare o cartesiano. La figura 8 mostra un esempio di diagramma cartesiano di questo tipo nel quale sono riconoscibili le traiettorie del 21 giugno, che comporta il valore massimo di  $\theta h$  al mezzogiorno solare, e del 21 dicembre, che invece si colloca all'estremo inferiore.

La figura 8 riporta anche il profilo delle ombre proiettate sul sito considerato. Queste possono essere costituite da costruzioni, alberi o rilievi che contornano il punto di osservazione.

Gli impianti ad inseguimento solare devono necessariamente tenere conto del percorso tracciato dal sole sulla volta celeste visto da un osser-

vatore posto sulla superficie terrestre. Per questi è quindi importante il calcolo puntuale dell'angolo  $\theta$  prima visto, il cui valore indica quanto il sistema di puntamento sia fuori asse rispetto alla componente diretta della radiazione solare.

Gli impianti fissi, viceversa, tendono ad essere inclinati ed orientati in modo tale da rendere massima l'energia media prodotta nel corso dell'anno o in un periodo più breve a seconda delle applicazioni richieste.

Si è visto precedentemente che l'energia solare raccolta è data dalla somma della componente diretta  $G_B$ , di quella diffusa  $G_D$  e di quella riflessa  $R$ . È ora possibile fare alcune considerazioni aggiuntive sul calcolo di queste componenti a partire dalla radiazione solare misurata sul piano orizzontale nelle sue componenti diretta  $H_B$  e diffusa  $H_D$ .

I valori relativi si possono ricavare, per il territorio italiano, dalla norma UNI 10349.

Il calcolo della componente diretta  $G_B$  è piuttosto complesso e va effettuato mese per mese con la procedura indicata, ad esempio, nella norma UNI 8477. Frequentemente si ricorre però a specifici programmi di calcolo, alcuni dei quali sono consultabili su internet, come ad esempio il PVGIS del Joint Research Centre di Ispra.

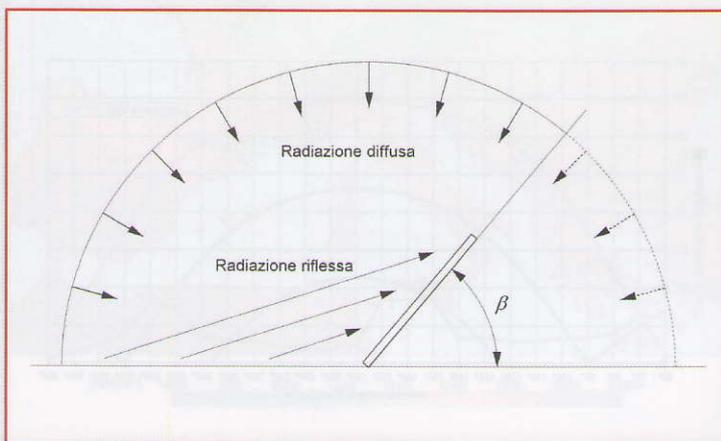
È molto importante invece comprendere come la disposizione dei componenti solari influenza le componenti diffusa  $G_D$  e riflessa  $R$  della radiazione. In figura 9 si può vedere, ad esempio, che per effetto dell'inclinazione del componente, non tutta la radiazione diffusa è visibile dallo stesso. Allo stesso modo è intuibile che la radiazione riflessa risulta invece essere tanto maggiore quanto più la superficie captante è inclinata rispetto all'orizzontale.

Tenuto conto di queste considerazioni, le componenti  $G_D$  e  $R$  sono calcolate nel modo seguente:

$$G_D = H_D \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2}$$

$$R = (H_B + H_D) \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}$$

Il parametro  $\rho$  è detto coefficiente di albedo e ha valore compreso tra 0 e 1. Esso tiene conto delle caratteristiche di ciò che circonda la superficie considerata. La tabella 1 riporta i valori tipici per una serie di casi.



▲ **Figura 9:** Effetto dell'inclinazione del dispositivo di captazione sulle componenti diffusa e riflessa della radiazione solare