

I SISTEMI FOTOVOLTAICI

1

LA RADIAZIONE SOLARE

- Strumenti per la progettazione

2

PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

- L'effetto fotovoltaico
- Celle e moduli
- Il generatore fotovoltaico
- Il BOS

3

APPLICAZIONI

- Sistemi isolati
- Sistemi connessi in rete

1 LA RADIAZIONE SOLARE

Radiazione Solare → l'energia elettromagnetica emessa dai processi di fusione dell'idrogeno contenuto nel sole.

Densità di Potenza → radiazione solare per unità di tempo e di superficie.

- Fuori l'atmosfera terrestre la potenza incidente su di una superficie unitaria, perpendicolare ai raggi solari, assume un valore di circa $1360W/m^2$ (variabilità del $\pm 3\%$ dovuta all'ellitticità dell'orbita terrestre), questo valore prende il nome di *Costante Solare*
- Sulla superficie terrestre, a livello del mare, in condizioni meteorologiche ottimali e sole a mezzogiorno, la densità di potenza è di circa $1000W/m^2$

1 LA RADIAZIONE SOLARE

Per quantificare la diversa entità della radiazione, in funzione della posizione del sole, si fa spesso riferimento al concetto di:

Air Mass 'AM' → Rapporto tra la lunghezza del percorso effettivo dei raggi solari e la lunghezza del loro percorso più breve → $AM = 1 / \sin(h)$ dove h è l'angolo di zenit;

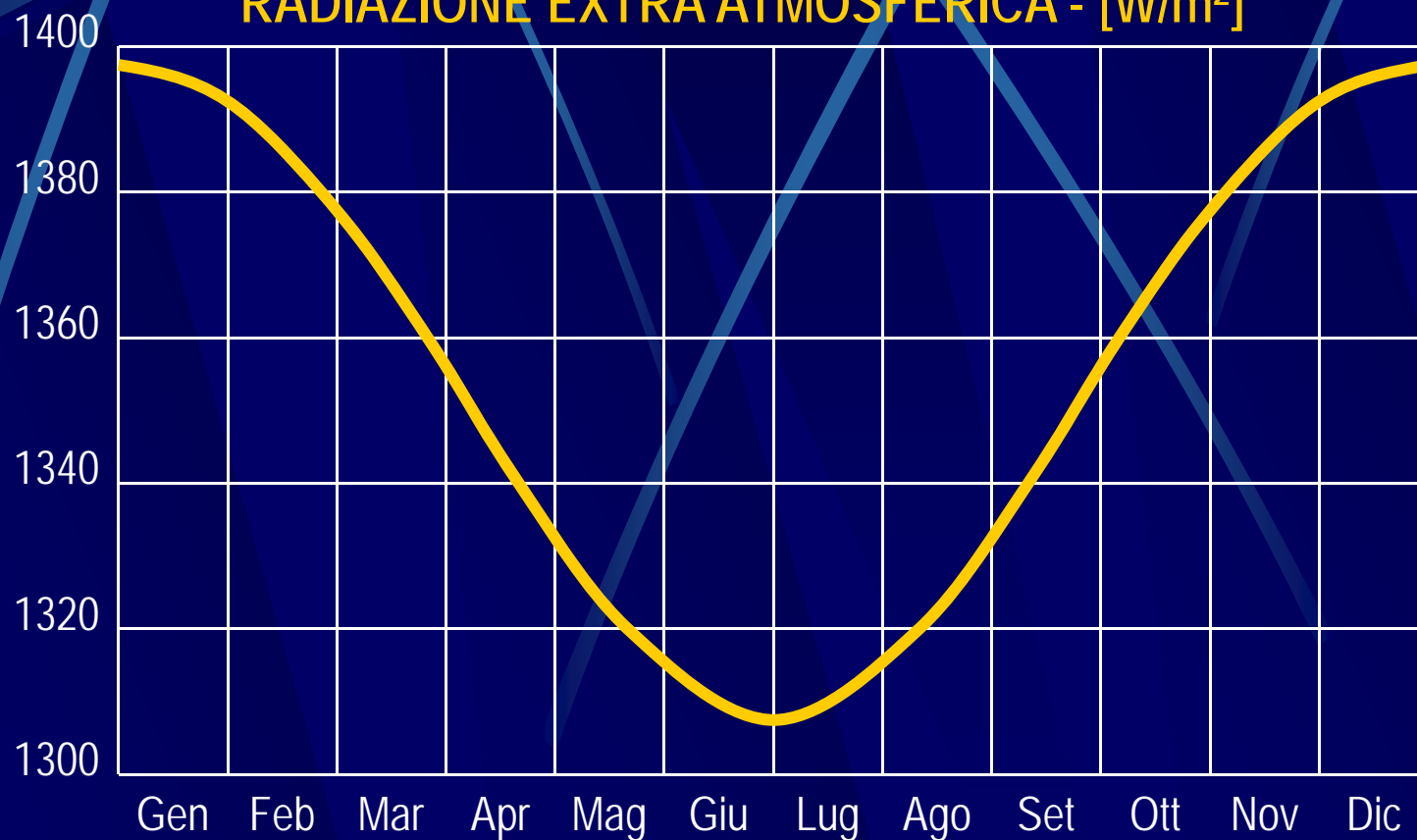
Air Mass One 'AM1' → condizione di AM in condizioni di atmosfera standard, valutato sulla superficie terrestre e misurato al livello del mare;

Air Mass Zero 'AM0' → condizione di AM fuori l'atmosfera.

1. LA RADIAZIONE SOLARE

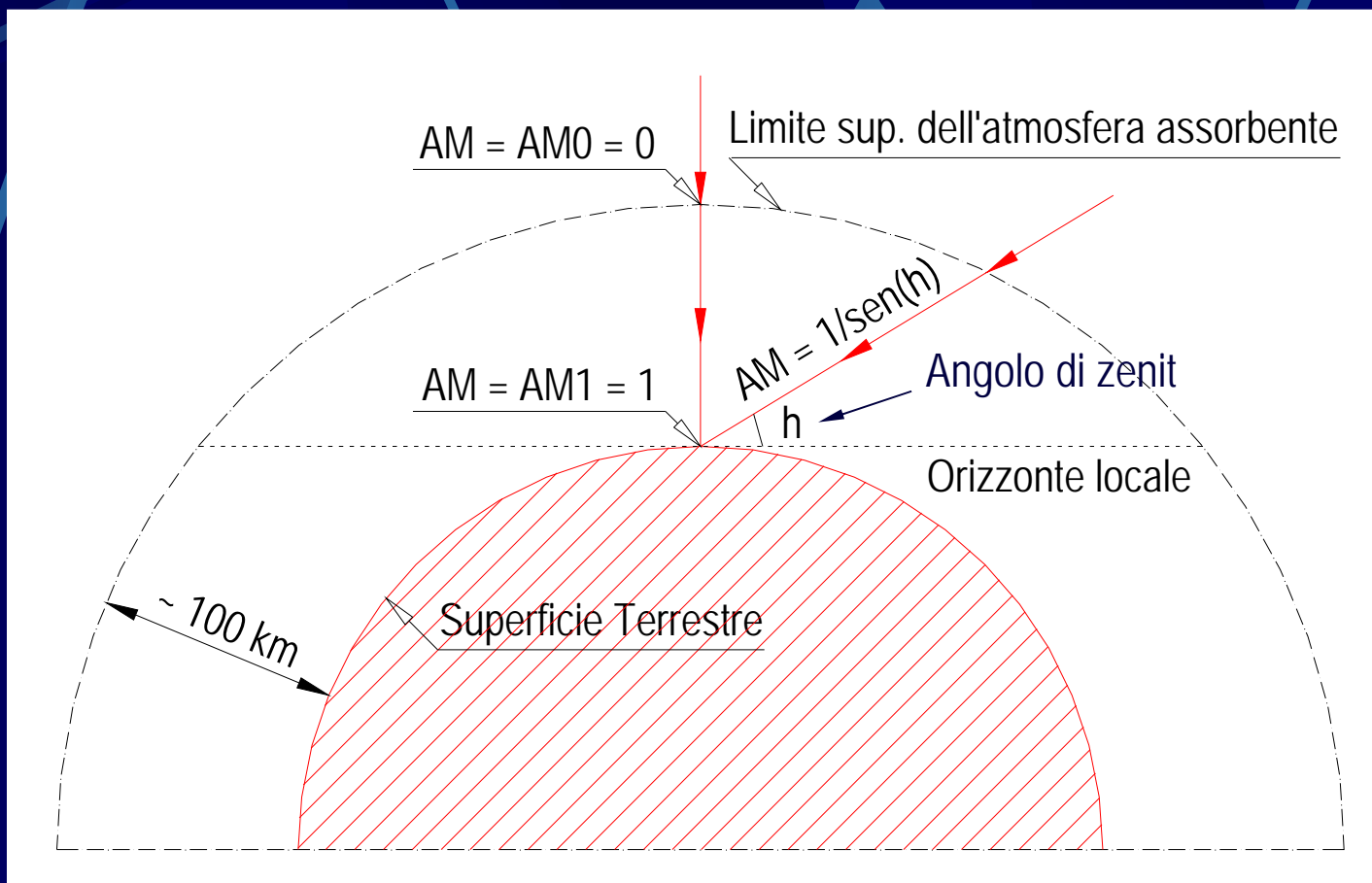
Costante solare $\rightarrow 1360 \text{ W/m}^2$

RADIAZIONE EXTRA ATMOSFERICA - $[\text{W/m}^2]$



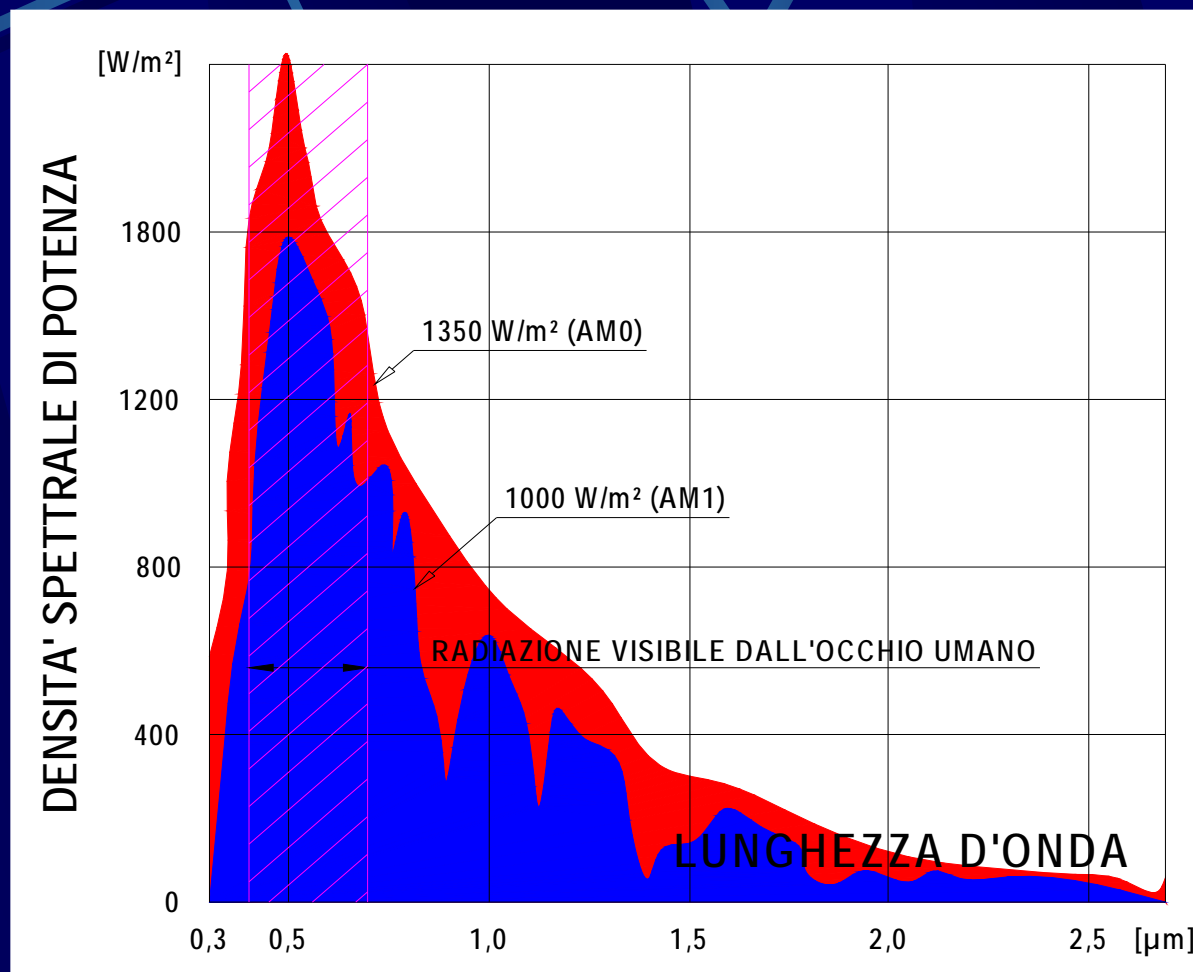
1. LA RADIAZIONE SOLARE

Air Mass \rightarrow $AM = 1/\sin(h)$



1. LA RADIAZIONE SOLARE

Spettro della radiazione solare



1 LA RADIAZIONE SOLARE

La radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre si distingue in:

- (1) diretta
- (2) diffusa
- (3) riflessa

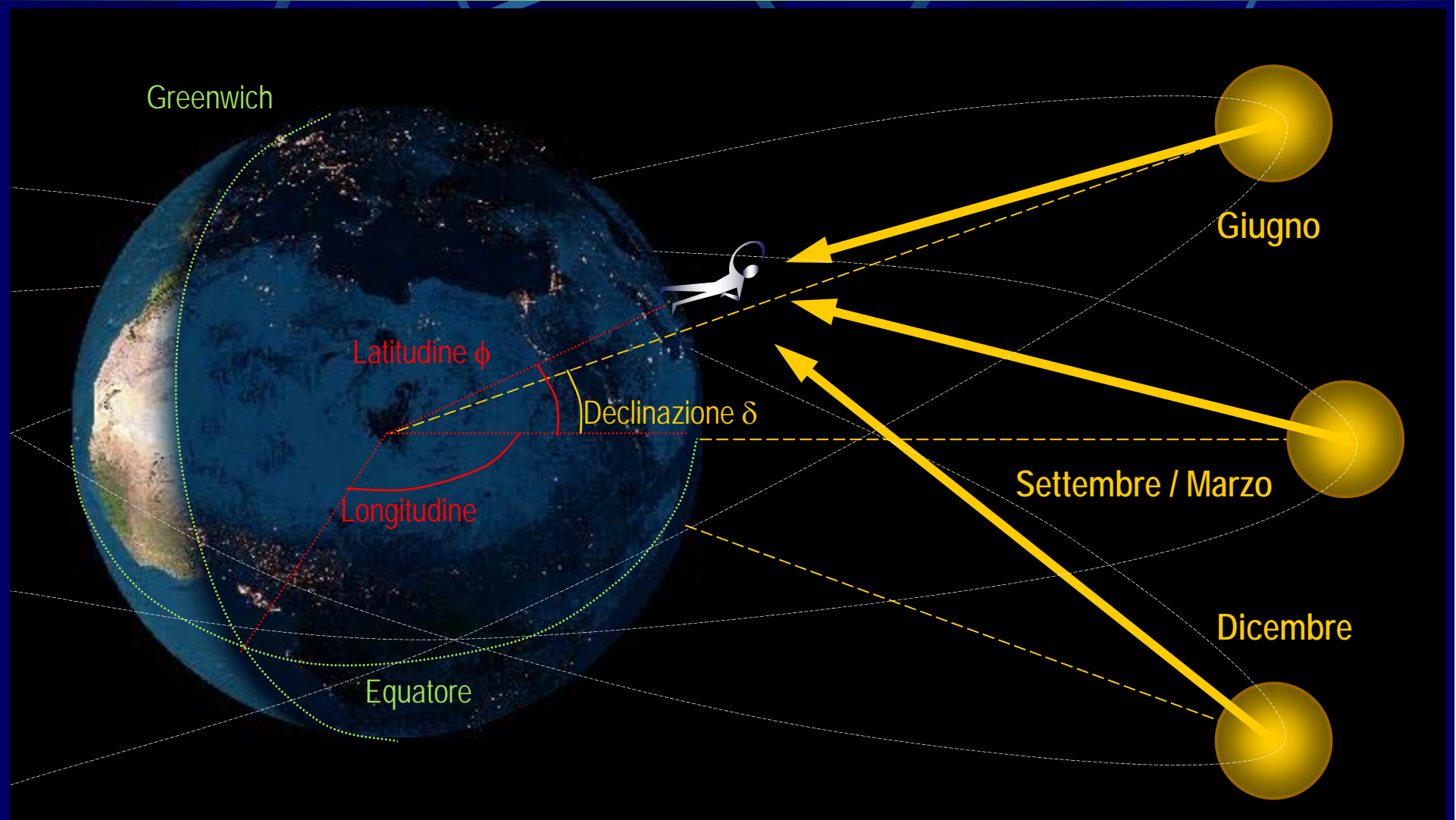
Le proporzioni di radiazione (1), (2) e (3) ricevuta da una superficie dipendono da:

- (a) condizioni meteorologiche
- (b) inclinazione della superficie
- (c) presenza di superfici riflettenti

1 LA RADIAZIONE SOLARE

L'intensità della radiazione solare incidente su una superficie al suolo è influenzata dall'angolo di inclinazione della radiazione stessa: → più piccolo è l'angolo che i raggi del sole formano con una superficie orizzontale → maggiore è lo spessore di atmosfera che essi devono attraversare

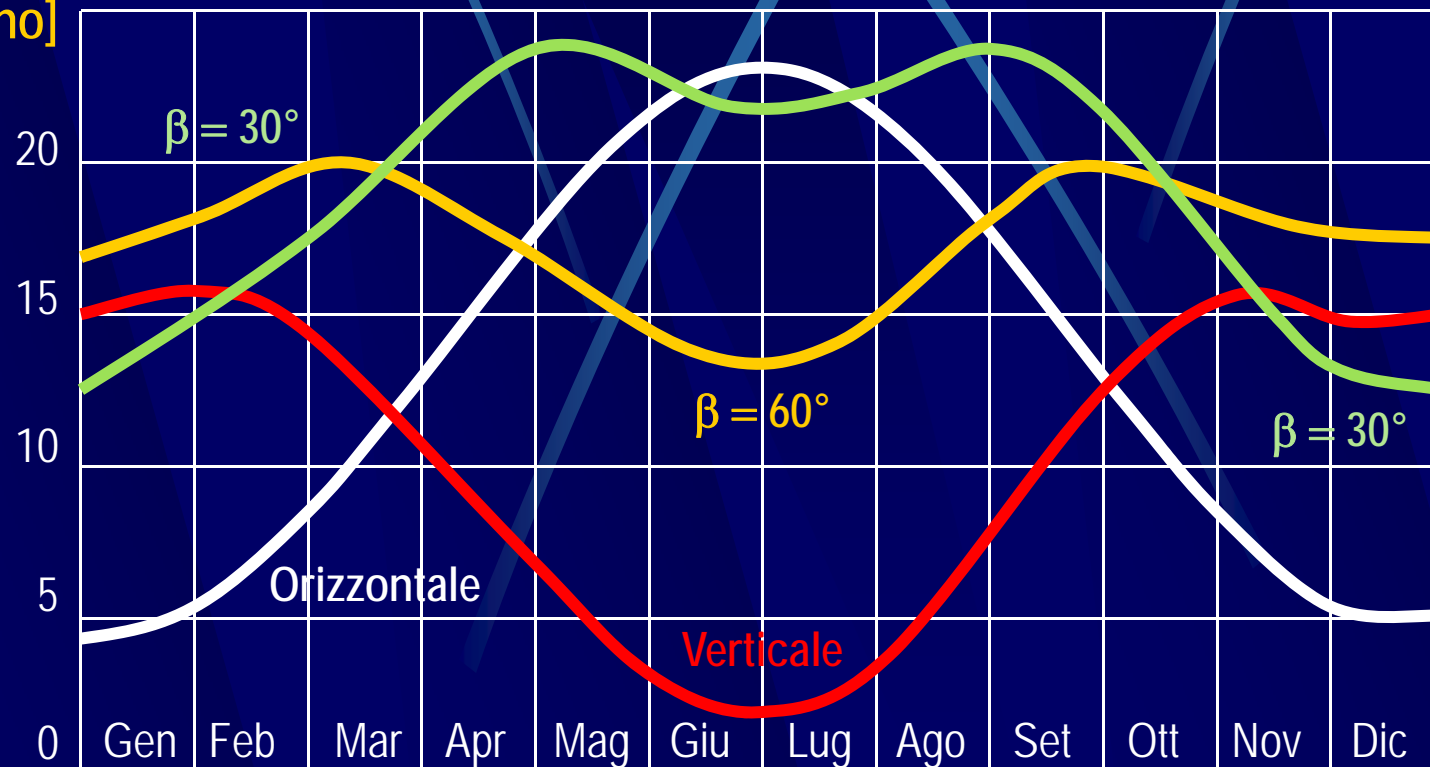
1 LA RADIAZIONE SOLARE



1. LA RADIAZIONE SOLARE

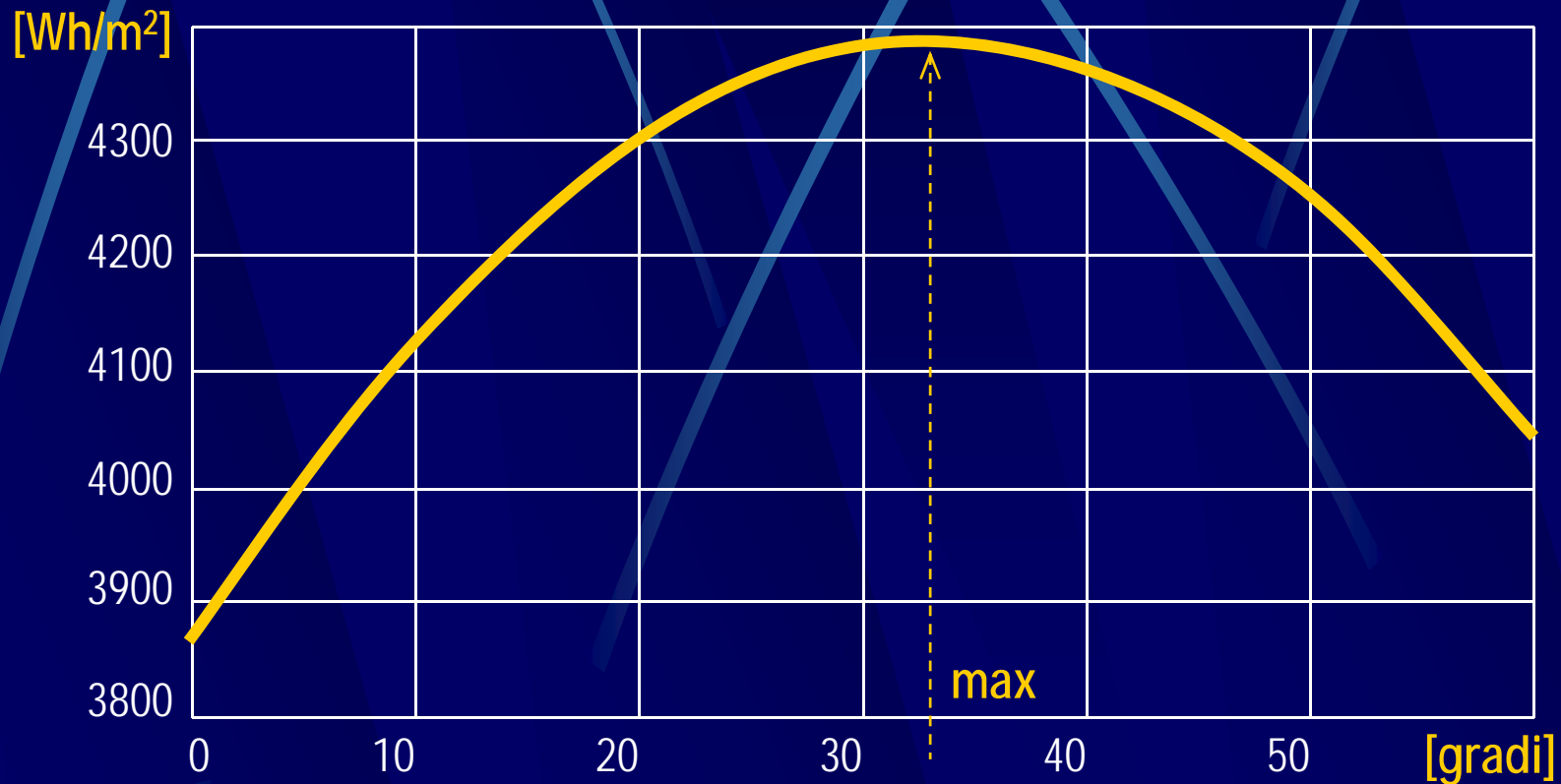
Confronto fra la radiazione solare giornaliera media incidente su superfici con differenti angoli di inclinazione β ed orientate a Sud (azimut $\gamma=0$). Località con latitudine $\phi=40^\circ$ Nord e cielo sereno

[MJ/m²/giorno]



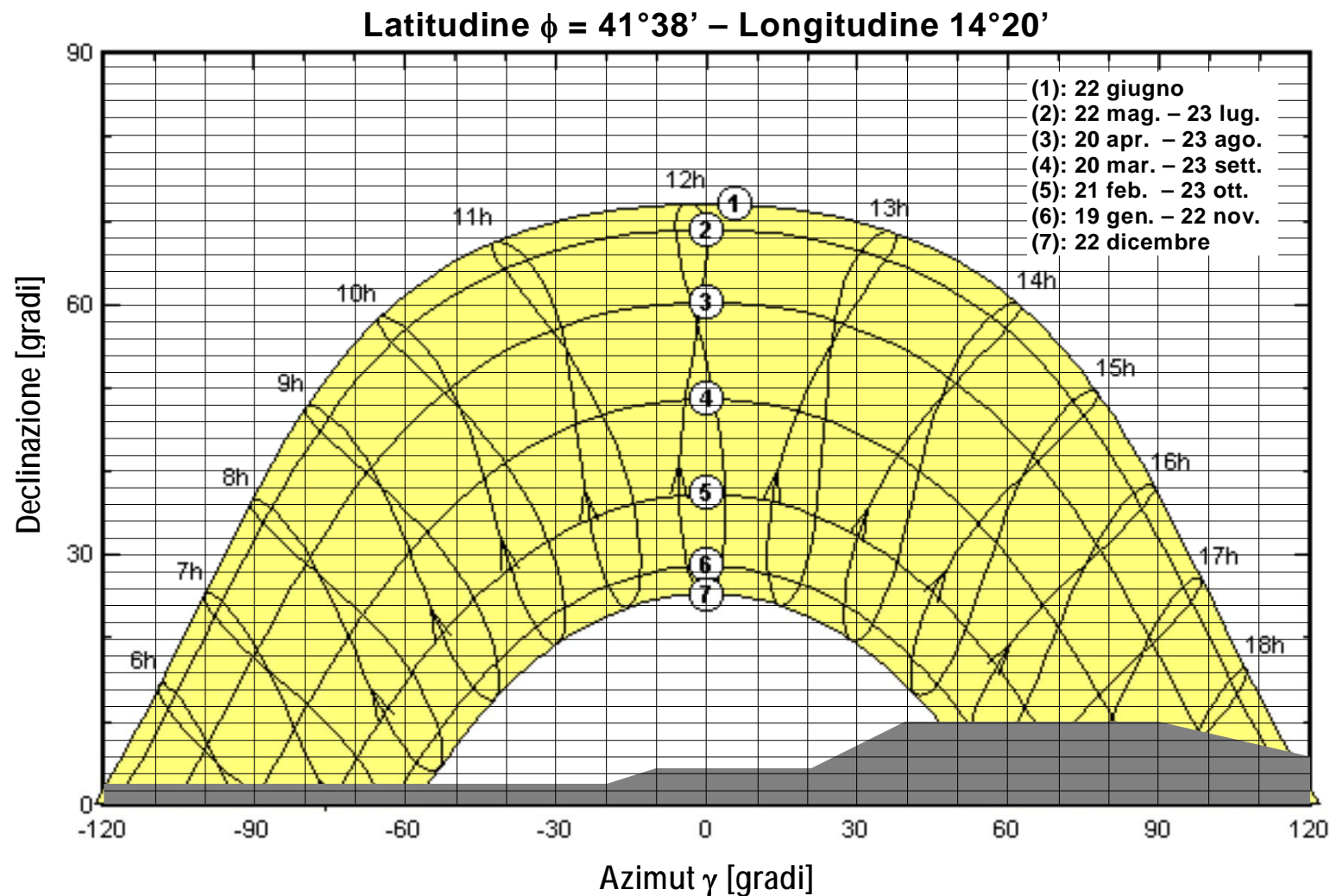
1. LA RADIAZIONE SOLARE

Andamento della radiazione solare giornaliera media annua al variare dell'inclinazione della superficie captante, orientata a Sud. Località con latitudine $\phi=43,68^\circ$ Nord



1. LA RADIAZIONE SOLARE

Profilo dei percorsi solari e della linea d'orizzonte



1. LA RADIAZIONE SOLARE

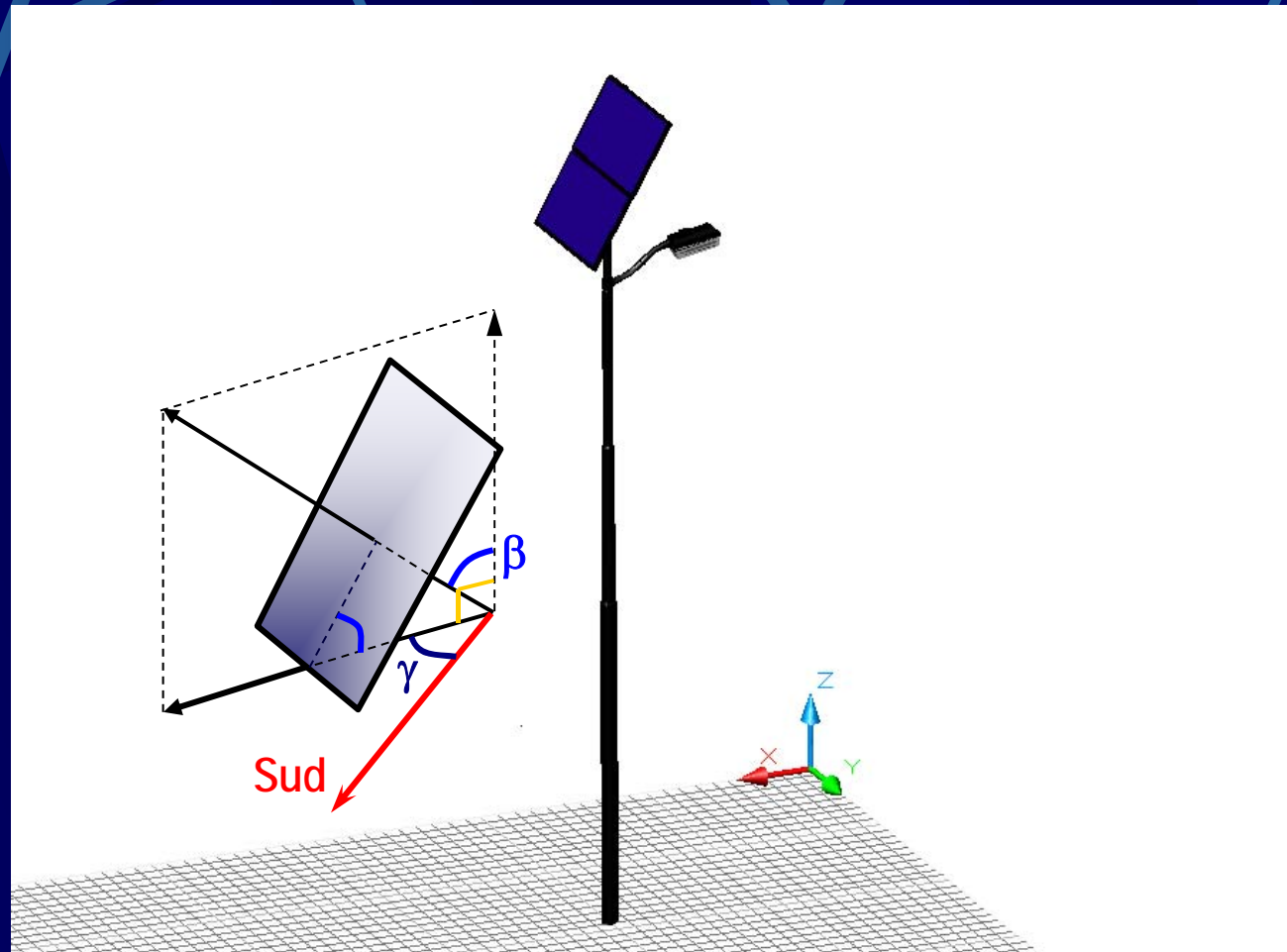
Dati della Radiazione Solare

La radiazione solare su una superficie inclinata può essere determinata mediante:

- Mappe isoradiative (generalmente non permettono di distinguere le componenti della radiazione diretta e diffusa) pubblicate da vari organismi
- Valori tabellati per ciascuna località (Servizio Meteorologico Nazionale)
- Metodi di calcolo sperimentali (*Norme UNI 10349 – UNI 8477, metodo di Liu e Jordan, ecc.*)

1. LA RADIAZIONE SOLARE

Angoli di inclinaz. β e di orientaz. γ di una superficie



1. LA RADIAZIONE SOLARE

Metodo di calcolo sperimentale dell'irraggiamento su una superficie orizzontale (Norma *UNI 10349*)

(1) Noti, per le principali città, i valori della irradiazione giornaliera media mensile [MJ/m^2], sul piano orizzontale, nelle componenti diretta e diffusa \rightarrow si risale al valore dell'irradiazione per un generico sito:

- Si identificano due località di riferimento
- Si calcola il valore dell'irradiazione come media ponderale dei valori delle due località di riferimento pesate rispetto alla latitudine, secondo la relazione:

$$\bar{H} = \bar{H}_{r1} + \frac{\bar{H}_{r2} - \bar{H}_{r1}}{\varphi_{r2} - \varphi_{r1}} \cdot (\varphi - \varphi_{r1})$$

con:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_{r1}} / \frac{\bar{H}_{r2}}{\varphi / \varphi_{r1}} / \varphi_{r1}$$

Irradiazione e latitudine
rispettivamente di calcolo e
delle località di riferimento

1. LA RADIAZIONE SOLARE

Metodo di calcolo sperimentale dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata ed orientata (*UNI 8477*)

- (2) Definita una superficie con una sua inclinazione β ed orientazione γ , l'irraggiamento giornaliero medio H , su base mensile, viene espresso in rapporto R al valore corrispondente medio H_h sul piano orizzontale:

$$\bar{H} = \bar{R} \cdot \bar{H}_h = \bar{R} \cdot \bar{K}_T \cdot \bar{H}_{h0}$$

Essendo H_{h0} il valore medio mensile dell'irraggiamento solare orizzontale extratmosferico - valore tabellato

con:

$$\bar{R} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_h}\right) \cdot \bar{R}_b \cdot \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_h} \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} + \rho \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}$$

\bar{R}_b

Valore medio mensile del rapporto tra l'irraggiamento diretto sulla superficie e quello sull'orizzontale

1. LA RADIAZIONE SOLARE

Metodo di calcolo sperimentale dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata ed orientata (*UNI 8477*)

con:

$$\overline{H}_d$$

Irraggiamento solare diffuso [MJ/m²] o [kWh/ m²]

$$\overline{H}_h$$

Irraggiamento solare globale orizzontale [MJ/m²] o [kWh/ m²]
valore tabellato

$$\frac{\overline{H}_d}{\overline{H}_h}$$

Frazione diffusa del soleggiamento

$$\rho$$

Riflettanza dell'ambiente circostante $\in [0,04 - 0,75]$
(relativamente a strade sterrate e neve fresca con film di ghiaccio) – valore tabellato

In mancanza di dati climatici diretti il rapporto $\overline{H}_d/\overline{H}_h$ è calcolato facendo uso della correlazione con il coefficiente K_T

$$\overline{K}_T = \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}_h}$$

Indice di soleggiamento reale

1. LA RADIAZIONE SOLARE

Metodo di calcolo sperimentale dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata ed orientata (*UNI 8477*) - *Calcolo di R_b*

Il coefficiente R_b si ricava a partire dai valori di H_b e H_{bh} che rappresentano rispettivamente il valore dell'irraggiamento solare diretto con e senza ostruzioni:

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{H}_b}{H_{bh}}$$

Indice di soleggiamento reale

$$H_b = G_0 \cdot \left[T \cdot \frac{\pi}{180} \cdot (\omega'' - \omega') + U \cdot (\text{sen} \omega'' - \text{sen} \omega') - V \cdot (\text{cos} \omega'' - \text{cos} \omega') \right]$$

con:

$$T = \text{sen} \delta \cdot (\text{sen} \varphi \cdot \text{cos} \beta - \text{cos} \varphi \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{cos} \gamma)$$

$$U = \text{cos} \delta \cdot (\text{cos} \varphi \cdot \text{cos} \beta - \text{sen} \varphi \cdot \text{sen} \beta \cdot \text{cos} \gamma)$$

$$V = \text{cos} \delta \cdot (\text{sen} \beta \cdot \text{sen} \gamma)$$

1. LA RADIAZIONE SOLARE

Metodo di calcolo sperimentale dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata ed orientata (*UNI 8477*) - *Calcolo di R_b*

con:

δ

Declinazione media mensile – angolo che la retta tracciata dal centro della terra al sole forma con il piano equatoriale – valori medi tabellati in funzione della latitudine

G_0

Costante solare – radianza su una superficie extratmosferica perpendicolare ai raggi solari - pari a 1353 W/m²

$$H_{bh} = 2 \cdot G_0 \cdot \left[T_h \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \omega_s + U_h \cdot \text{sen} \omega_s \right]$$

$$T_h = \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \varphi$$

$$U_h = \text{cos} \delta \cdot \text{cos} \varphi$$

$$V_h = 0$$

Coefficienti T, U e V valutati sul piano orizzontale ($\beta = 0$)

1. LA RADIAZIONE SOLARE

Metodo di calcolo sperimentale dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata ed orientata (*UNI 8477*) - *Calcolo di R_b*

con:

ω

Angolo orario (tiene conto della rotazione della terra attorno al proprio asse), il suo valore ($\omega \in [0^\circ 360^\circ]$) può essere ricavato dall'espressione $\omega = 15 \cdot (t_s - 12)$ dove t_s , compresa tra 0 e 24, è l'ora legale;

ω' ω''

Angoli orari ω' e ω'' rispettivamente dell'apparire e dello scomparire del sole per la superficie esposta; essi dipendono dalla giacitura della superficie e da eventuali ostruzioni;

ω_s

Per un piano orizzontale, in assenza di ostruzioni, gli angoli orari ω' e ω'' coincidono rispettivamente con $-\omega_s$ e ω_s (angolo orario del sorgere e del tramonto astronomico).

1. LA RADIAZIONE SOLARE

ESEMPIO 1

Calcolo dell'energia solare annua, su base media mensile, captata da una superficie $s=10\text{m}^2$ caratterizzata da:

- Inclinazione $\beta=50^\circ$
- Azimut $\gamma=10^\circ$
- Assenza di fenomeni di ombreggiamento ($\omega'=-\omega_s$ e $\omega''=\omega_s$)
- Riflettanza $\rho=0,20$

Posta in una località priva di ombreggiamenti di Cassino (lat. $\varphi=41^\circ 38'$)



$$\text{Energia solare annua} = \sum_1^{12} (\text{Irraggiamento medio mensile}) \cdot \text{sup.}$$

1. LA RADIAZIONE SOLARE

ESEMPIO 1

$$\bar{E}_{\text{anno}} = \sum_{\text{mese}=1}^{12} (\bar{R}_{\text{mese}} \cdot \bar{H}_{h_{\text{mese}}} \cdot n_{\text{giorni}_{\text{mese}}}^{\circ}) \cdot s$$

$$\rho_{\text{mese}} \cong \rho$$

$$\bar{R}_{\text{mese}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_{d_{\text{mese}}}}{\bar{H}_{h_{\text{mese}}}} \right) \cdot \bar{R}_{b_{\text{mese}}} \cdot \frac{\bar{H}_{d_{\text{mese}}}}{\bar{H}_{h_{\text{mese}}}} \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} + \rho_{\text{mese}} \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}$$

$$\frac{\bar{H}_{d_{\text{mese}}}}{\bar{H}_{h_{\text{mese}}}}$$

Rapporto riportato nel *Prospetto II* della norma UNI 8477 in funzione dell'indice di soleggiamento →

$$\bar{K}_{T_{\text{mese}}}$$

$$\bar{R}_{b_{\text{mese}}} = \frac{\bar{H}_{b_{\text{mese}}}}{\bar{H}_{bh_{\text{mese}}}} = 1$$

Valore unitario in quanto abbiamo ipotizzato l'assenza di fenomeni di ombreggiamento

1. LA RADIAZIONE SOLARE

ESEMPIO 1

Calcolo dell'irraggiamento globale orizzontale giornaliero medio mensile [kWh/(m²· giorno)]:

$$\bar{H}_h_{\text{mese}}$$

Dall'appendice B della *UNI 8477* si evincono i valori di H_h relativi a diverse località italiane. E' possibile valutare l'irraggiamento giornaliero medio mensile per la latitudine in esame (Cassino 41°38') interpolando i valori di due stazioni meteorologiche prossime alla lat. 41°38'

Località	Latitudine	Mesi											
		Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Roma Ciampino	41°48'	1,78	2,45	3,72	5,2	6,64	7,24	7,41	6,44	4,87	3,27	1,94	1,47
Foggia Amendola	41°32'	1,75	2,63	3,79	5,34	6,39	6,85	7,24	6,41	4,86	3,35	2,06	1,5
Cassino	41°38'	1,76	2,56	3,76	5,29	6,48	7,00	7,30	6,42	4,86	3,32	2,02	1,49

1. LA RADIAZIONE SOLARE

ESEMPIO 1

Calcolo dell'indice di soleggiamento reale K_T :

$$\bar{K}_{T_{\text{mese}}} = \frac{\bar{H}_{h_{\text{mese}}}}{\bar{H}_{h0_{\text{mese}}}}$$

Calcolati, per ciascun mese, i valori dell'irraggiamento H_h giornaliero medio mensile e noti dal *Prospetto I* i valori medi mensili dell'irraggiamento solare orizzontale extr'atmosferico H_{h0} per le latitudini 41° e 42° , si ottengono per interpolazione i valori di H_{h0} [kWh/(m²· giorno)] per la latitudine $41^\circ 38'$

Latitudine	Mesi											
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
42°	3,84	5,33	7,29	9,37	10,87	11,49	11,16	9,93	8,03	5,9	4,19	3,44
41°	4,01	5,49	7,42	9,44	10,89	11,48	11,17	9,99	8,14	6,05	4,35	3,61
41°38'	3,95	5,43	7,37	9,41	10,88	11,48	11,17	9,97	8,10	5,99	4,29	3,55

Calcolato l'indice K_T , dal *Prospetto II* si evince il valore di $H_d_{\text{mese}} / H_h_{\text{mese}}$:

	Mesi											
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
K_T	0,45	0,47	0,51	0,56	0,60	0,61	0,65	0,64	0,60	0,55	0,47	0,42
H_d/H_h	0,44	0,42	0,39	0,34	0,3	0,29	0,25	0,26	0,3	0,35	0,42	0,47

1. LA RADIAZIONE SOLARE

ESEMPIO 1

$$\bar{E}_{\text{anno}} = \sum_{\text{mese}=1}^{12} \left(\bar{R}_{\text{mese}} \cdot \bar{H}_{h_{\text{mese}}} \cdot n_{\text{giorni}_{\text{mese}}}^{\circ} \right) \cdot s$$

$$\bar{R}_{\text{mese}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_{d_{\text{mese}}}}{\bar{H}_{h_{\text{mese}}}} \right) \cdot \bar{R}_{b_{\text{mese}}} \cdot \frac{\bar{H}_{d_{\text{mese}}}}{\bar{H}_{h_{\text{mese}}}} \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2} + \rho_{\text{mese}} \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}$$



$$\bar{E}_{\text{anno}} = \left[\bar{R}_{\text{gen}} \cdot \bar{H}_{h_{\text{gen}}} \cdot 31 + \bar{R}_{\text{feb}} \cdot \bar{H}_{h_{\text{feb}}} \cdot 28 + \dots + \bar{R}_{\text{nov}} \cdot \bar{H}_{h_{\text{nov}}} \cdot 30 + \bar{R}_{\text{dic}} \cdot \bar{H}_{h_{\text{dic}}} \cdot 31 \right] \cdot s$$



LA RADIAZIONE SOLARE

Radiazione Diffusa

L'atmosfera diffonde le radiazioni solari.

La diffusione dipende dai seguenti fattori:

- Cielo coperto \implies quasi completa diffusione;
- Cielo sereno \implies 15% radiazione diffusa.

$$D = D_{or} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2}$$

Potenza diffusa raccolta da
un pannello orizzontale