

IUA V - MASTER PROGETTAZIONE DELLA LUCE A.A. 2002/2003

Lezione del 2 settembre 2003

**Titolo: Luce ed energia nella città, valutazione in tessuti urbani complessi**

**Docente: A. Carbonari**

## **Parte 1° : LA RADIAZIONE SOLARE DAL PUNTO DI VISTA ENERGETICO**

La radiazione solare che può raggiungere una superficie generica situata al suolo è costituita da tre componenti:

- diretta dal sole, attenuata dall'atmosfera,
- diffusa dall'atmosfera,
- la riflessa in modo diffuso dal paesaggio circostante (terreno ed ostruzioni urbane), detta anche *albedo*.

La somma dei valori istantanei delle tre componenti della radiazione costituisce l'*intensità della radiazione solare totale* incidente sulla superficie [ $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$  o  $\text{W m}^{-2}$ ] o *insolazione*, il valore dell'*energia solare disponibile* in un dato periodo [ $\text{MJ m}^{-2}$  o  $\text{kWh m}^{-2}$ ] risulta dalla sommatoria dei valori istantanei relativi ai singoli passi temporali in esso compresi moltiplicati per la durata del passo temporale.

Nel caso di analisi stagionali od annuali per giorni-tipo mensili, il valore relativo al giorno-tipo viene moltiplicato per il numero dei giorni del mese.

Le tre componenti della radiazione sono calcolate come di seguito descritto.

### **LA POSIZIONE DEL SOLE**

Relativamente ad ogni passo di calcolo va dapprima calcolata la posizione del sole, vale a dire gli angoli di azimut ( $\gamma$ ) e di alzata ( $\alpha$ ), relativi alla località, dunque l'angolo di incidenza ( $\theta$ ) fra direzione dei raggi solari e normale alla superficie [1].

Per calcolare la posizione del Sole è necessario conoscere il valore dei seguenti angoli.

- **f latitudine** (da 0 a  $90^\circ$  nell'emisfero settentrionale,
- **w angolo orario** (nullo al mezzogiorno solare,  $15^\circ$  per ogni ora),
- **b inclinazione** della superficie in esame (angolo che essa forma con l'orizzontale),
- **g direzione**, o angolo azimutale, della superficie in esame,
- **d declinazione**, angolo tra i raggi solari ed il piano equatoriale misurato sul piano meridiano passante per il Sole al mezzogiorno solare al meridiano considerato (assumendo la direzione Nord come positiva).

Quest'ultima è ricavabile dalla seguente relazione empirica, dove n è il numero progressivo del giorno dell'anno:

$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen} \left[ 360 \frac{284 + n}{365} \right]$$

angolo orario (in radianti) indicando con n il numero dell'ora è dato da::

$$\omega = n - 12 \cdot 15 \cdot \frac{2 \cdot P}{360}$$

si possono quindi calcolare l'alzato:

$$\alpha = \arcsin((\cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)) + \sin(\phi) \cdot \sin(\delta))$$

e l'azimut:

$$\gamma = \arcsin \left( \frac{\cos d \cdot \sin w}{\sin(\pi/2 - a)} \right)$$

Per una superficie generica il coseno dell'angolo di incidenza ( $\theta$ ) è calcolabile con la seguente equazione:

$$\cos \theta = \cos \phi \cos \beta \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \delta \cos \omega + \sin \beta \sin \gamma \cos \delta \sin \omega + \sin \phi \cos \beta \sin \delta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \sin \delta$$

## L'INTENSITÀ DELLA RADIAZIONE SOLARE INCIDENTE E LE SUE COMPONENTI.

Per calcolare l'entità di tutte e tre le componenti si parte dalla costante solare: l'energia solare che incide nell'unità di tempo su una superficie normale ai raggi collocata fuori dell'atmosfera ed alla distanza media tra Terra e Sole: 1353 [W m<sup>-2</sup>].

Tenendo conto della variazione della distanza Terra - Sole nei vari giorni dell'anno e dell'angolo di incidenza  $\theta$  dei raggi su una superficie orizzontale, si calcola quindi l'intensità della radiazione extra-atmosferica su superficie orizzontale in ogni istante del giorno "n":

$$I_o = \left( 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360}{365} n \right) \right) I_{sc} \cos(\theta) \quad [\text{W m}^{-2}]$$

integrandone i valori nel tempo tra alba e tramonto, si ottiene la radiazione extra-atmosferica giornaliera su superficie orizzontale:

$$H_0 = \int_{-\omega_s}^{+\omega_s} I_0 d\left(\frac{24}{2p} \omega\right) \quad [\text{Wh m}^{-2} \text{giorno}^{-1}]$$

dove  $w$  è l'angolo orario, mentre  $-\omega_s$  e  $+\omega_s$  sono gli angoli orari di alba e tramonto.

Dalla correlazione di Lyu e Jordan [1] si ottiene il rapporto fra radiazione diffusa ( $H_d$ ) e radiazione totale ( $H$ ), entrambe giornaliere su superficie orizzontale al suolo:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1.0045 + 0.04349 K_t - 3.5227 K_t^2 + 2.6313 K_t^3$$

Tale rapporto è funzione dell'indice di nuvolosità giornaliero o coefficiente di trasparenza atmosferica giornaliero ( $K_t$ ), che è definito come il rapporto tra la radiazione globale giornaliera media mensile misurata a terra su una superficie orizzontale ( $\bar{H}_0$ ) e radiazione globale giornaliera media mensile extra-atmosferica ( $\bar{H}_0$ ):

$$K_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$$

Esso può assumere valori compresi tra poco più di zero ed un massimo di circa 0.75

La frazione di radiazione diffusa cresce con l'aumentare della nuvolosità.

Successivamente, usando le correlazioni [2] che forniscono i rapporti tra valori orari (o istantanei) medi mensili e valori giornalieri medi mensili relativamente alla radiazione diffusa ( $I_{dh}/H_d$ ) ed alla radiazione totale ( $I_h/H$ ):

$$\frac{\bar{I}_{dh}}{\bar{H}_d} = \frac{p}{24} \frac{\cos w - \cos v_s}{\sin v_s - \frac{p}{180} \cos v_s}$$

$$\frac{\bar{I}_h}{\bar{H}} = \frac{p}{24} (a + b \cos w) \frac{\cos w - \cos v_s}{\sin v_s - \frac{p}{180} \cos v_s}$$

dove:

$$a = 0.409 + 0.5016 \cdot \text{sen}(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \cdot \text{sen}(\omega_s - 60)$$

si ottengono i valori orari delle tre componenti della radiazione su una superficie di orientamento ed inclinazione generici situata al suolo.

Radiazione diretta:

$$I_h(\Phi) = \left( \frac{I_h}{H} - \frac{I_{dh}}{H_d} \frac{H_d}{H} \right) H_0 K_t \frac{\cos \Phi}{\text{sen } a} \quad [\text{W m}^{-2}]$$

Radiazione diffusa dalla volta celeste:

$$I_{dh}(\Phi) = \frac{I_{dh}}{H_d} \frac{H_d}{H} H_0 K_t FV_{\text{cielo}} \quad [\text{W m}^{-2}]$$

Radiazione riflessa in modo diffuso dal paesaggio urbano:

$$I_{ah}(\Phi) = \frac{I_h}{H} r H_0 K_t FV_{\text{ostruzioni}} \quad [\text{W m}^{-2}]$$

Dove il significato dei simboli è il seguente:

- $q$ : angolo fra la direzione dei raggi solari e la normale alla superficie, ovvero angolo di incidenza,
- $a$ : altezza del sole sull'orizzonte,
- $r$ : coefficiente medio di albedo (o riflessività) dell'ambiente urbano circostante (terreno più ostruzioni),
- $H_0$ : radiazione extra-atmosferica giornaliera su superficie orizzontale [ $\text{Wh m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ ],

le seguenti quattro grandezze sono riferite ad una superficie orizzontale situata al suolo:

- $I_{dh}$ : radiazione diffusa sull'orizzontale, valore orario medio mensile [ $\text{W m}^{-2}$ ],
- $H_d$ : radiazione diffusa sull'orizzontale, valore giornaliero medio mensile [ $\text{Wh m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ ],
- $I_h$ : radiazione totale sull'orizzontale, valore orario medio mensile [ $\text{W m}^{-2}$ ],
- $H$ : radiazione totale sull'orizzontale, valore giornaliero medio mensile [ $\text{Wh m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ ],
- $FV_{\text{cielo}}$ : fattore di vista superficie in esame - volta celeste visibile,
- $FV_{\text{ostruzioni}}$ : fattore di vista superficie in esame - paesaggio urbano.

Le ultime due relazioni, basate su un modello sempre di Lyu e Jordan, sono qui modificate rispetto alla loro versione originale. Infatti in essa, anziché i termini  $FV_{cielo}$  e  $FV_{ostruzioni}$ , appaiono rispettivamente le seguenti espressioni:

$$(1+\cos(\beta))/2 \quad \text{e} \quad (1-\cos(\beta))/2$$

in cui il simbolo  $\beta$  rappresenta l'inclinazione della superficie in esame rispetto all'orizzontale. Tali espressioni rappresentano i fattori di vista con cui l'elemento di superficie in esame vedrebbe la volta celeste ed il terreno, se non si tenesse conto della presenza di eventuali ostruzioni urbane. Pertanto esse sono state sostituite con i fattori di vista  $FV_{cielo}$  e  $FV_{ostruzioni}$ , che consentono di tener conto delle quote di volta celeste e di paesaggio urbano effettivamente viste dall'elemento di superficie considerato.

Per quanto riguarda la componente di radiazione diffusa dal paesaggio urbano, si noterà che essa viene calcolata a partire dalla radiazione totale su superficie orizzontale (H). Questo è corretto solo nel caso si tratti della radiazione riflessa dal terreno, quando invece la radiazione è riflessa da superfici verticali si dovrebbe partire dalla radiazione incidente su di esse.

## **Bibliografia**

1. Lazzarin R., *Sistemi solari attivi, manuale di calcolo* (Solar passive systems, a calculation handbook) ed. F. Muzzio & C. (Padova: 1981)
2. Collares-Pereira M., A. Rabl, 'The average distribution of solar radiation. Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values', In *Solar Energy* no 22, 155- and followings
3. R.G. Hopkinson, P. Petherbridge, J. Longmore, 'Daylighting', ed. Heinemann. (London: 1963)
4. M. Cucumo, D. Kaliakatzos, V. Marinelli, M. D. Vivacqua, 'Metodi di calcolo della luminanza del cielo e dell'illuminamento naturale su superfici esterne' ('Calculation methods of sky luminance and daylighting of external surfaces') In *CDA* no 5 Maggio 1997, 485 – 496