

Progetto CNR Energy+: metodo di calcolo semplificato per la scomposizione della radiazione solare globale e la stima della produzione da fotovoltaico.

S. Di Cristofalo*, e-mail: salvatore.dicristofalo@cnr.it

*Istituto per l'Ambiente Marino Costiero - Consiglio Nazionale delle ricerche - UOS di Torretta Granitola

Abstract

Scopo del presente lavoro è la presentazione del codice di calcolo semplificato adoperato nella sezione "Simulatore fotovoltaico" presente sul portale www.energia.cnr.it del progetto CNR ENERGY+.

Utilizzando i valori reali di radiazione solare misurati dalle stazioni meteorologiche installate presso alcune sedi del CNR il codice, con appropriati algoritmi, genera la scomposizione della radiazione sul piano orizzontale e su superfici inclinate e variamente orientate, in modo da pervenire alla potenza prodotta da un ipotetico impianto fotovoltaico posto sullo stesso sito di ubicazione della stazione.

SOMMARIO

Abstract

1. Introduzione

2. Calcolo della posizione apparente del sole nel cielo

Angolo orario

Declinazione solare

Equazione del Tempo

Ora solare vera

Altezza del sole

Calcolo Alba e tramonto

3. Calcolo della posizione del sole relativa a superfici di diversa inclinazione e orientamento

Angolo di incidenza

Percorsi solari

4. Radiazione solare

La costante solare

La radiazione solare extra-atmosferica sul piano orizzontale

La radiazione solare al suolo

5. Stima della radiazione diretta e diffusa su superfici orizzontali

Indice di luminosità

Indice di nitidezza

Modelli di regressione

Correlazioni di Erbs et al. (1982).

6. Stima delle componenti la radiazione su superfici di diversa inclinazione e orientamento

7. Modello energetico semplificato per la simulazione della produzione da impianti fotovoltaici

8. Conclusioni

Bibliografia

Sitografia

1. Introduzione

Sul territorio italiano, non si dispone di una rete capillare di sensori di radiazione solare che misurino tale parametro sia sul piano orizzontale, sia su piani inclinati e diversamente orientati.

La maggior parte delle stazioni di acquisizione dati meteorologici di tipo professionale, complete di sensori per la misura delle componenti della radiazione, per gli alti costi, restano in dotazione di università e centri di ricerca.

Esiste invece una serie di stazioni semiprofessionali installate in Italia anche per scopi amatoriali che, se dotate di solarimetro, potrebbero fornire anche una misura locale seppur empirica dei livelli di radiazione solare diretta, diffusa e riflessa, in prima approssimazione utili per l'analisi energetiche e la progettazione bioclimatica degli edifici.

Questa applicazione vuole offrire la possibilità di scomporre il dato di radiazione solare globale sul piano orizzontale ed estendere la conoscenza delle altre componenti solari di radiazione in modo da permettere una correlazione territoriale con le stazioni professionali più vicine al sito di acquisizione.

Il modello di calcolo semplificato è poi adottato nella stessa sezione del portale www.energia.cnr.it del progetto CNR ENERGY+ per ricondurre alla potenza generata da un ipotetico impianto fotovoltaico posizionato nello stesso sito della stazione meteorologica.

2. Calcolo della posizione apparente del sole nel cielo

Il modello prevede la possibilità di essere applicato alle diverse latitudini e longitudini del globo. A tale scopo è utile sottolineare che gli algoritmi che seguiranno terranno conto di tali grandezze in termini decimali. Nel caso, occorre quindi, eseguire una conversione da gradi sessagesimali a decimali.

In basso un esempio di conversione, coordinate di Pisa:

LAT	LONG
43,71972	10,42222
43 °	10 °
43 min	25 min
11 sec	20 sec

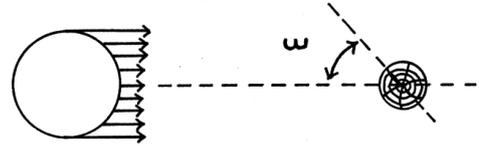
Il codice di calcolo semplificato tiene conto della posizione apparente del sole nella volta celeste. I due movimenti della terra di rotazione e rivoluzione intorno al sole si traducono, per un osservatore posto in un punto qualunque, in un moto apparente del sole in cielo. La posizione del sole può calcolarsi attraverso il calcolo di alcuni parametri fondamentali: l'angolo orario, la declinazione e la latitudine.

Angolo orario

Il Tempo Universale Coordinato (UTC), conosciuto anche come tempo civile è il fuso orario di riferimento

da cui sono calcolati tutti gli altri fusi orari del mondo. Per l'Italia vale UTC+1 ovvero un'ora in più rispetto al meridiano di riferimento.

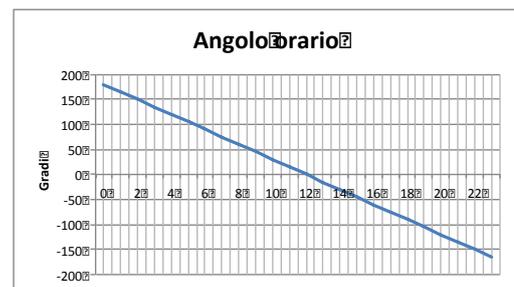
L'angolo orario è formato dal piano meridiano passante per l'osservatore con il piano meridiano passante per il sole.



Esso varia, durante la giornata, con una velocità costante di 15 gradi/ora (la rotazione della Terra (360 gradi) avviene in 24 ore; vale zero a mezzogiorno e aumenta di 15° ogni ora a partire da mezzogiorno. Con valori positivi prima di mezzogiorno e negativi dopo. Esso si calcola, quindi:

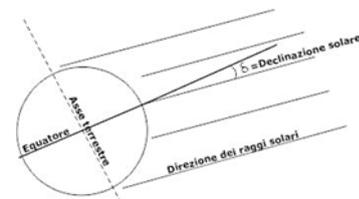
$$\omega = 15^\circ(12 - h)$$

dove h = ora vera solare espressa in ore decimalizzate e assume valori nel range da +180 a -180.



Declinazione solare

La declinazione solare rappresenta l'angolo che la direzione dei raggi solari forma a mezzogiorno, sul meridiano considerato, col piano equatoriale; ovvero 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.



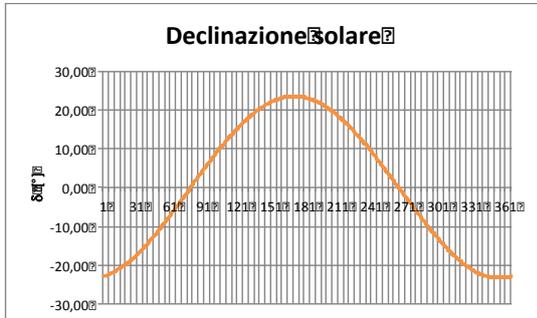
Il valore della declinazione si può esprimere mediante l'equazione approssimata di Cooper (1986),

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

Dove:

n = numero progressivo dei giorni dell'anno 1...365.

La figura sottostante rappresenta graficamente la funzione sinusoidale della declinazione con gli estremi di $\pm 23,45^\circ$ pari all'inclinazione dell'asse terrestre. Essa diventa positiva quando il sole sta al di sopra del piano equatoriale ed è negativa quando il sole è al di sotto di esso.



Equazione del Tempo

Un giorno solare è l'intervallo di tempo nel quale il Sole completa un ciclo intorno ad un osservatore posizionato in modo stazionario sulla Terra. Come noto, esso non coincide con l'ora civile, ovvero al tempo occorrente alla Terra per eseguire il suo moto di rotazione intorno al suo asse.

La durata del giorno è influenzata dalla declinazione del Sole e dalla posizione della Terra nella sua orbita; questi due fattori determinano lo spostamento del mezzogiorno locale e una variazione non simmetrica degli orari di sorgere e tramontare del Sole.

La differenza tra ora solare e quella civile prende il nome di Equazione del tempo, si misura in minuti ed è data dalla seguente formula:

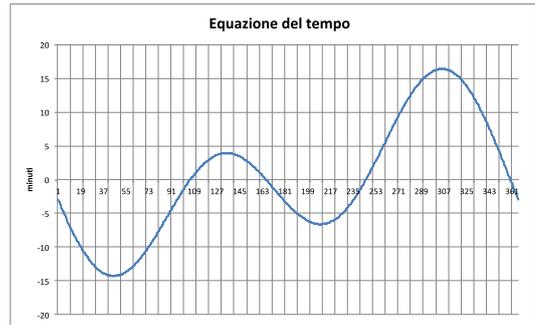
$$\Psi = (0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \sin \Gamma - 0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma) \cdot 229,18$$

Dove Γ è l'angolo giornaliero, giorno dell'anno dal 1 gennaio al 31 dicembre espresso in radianti, calcolato con:

$$\Gamma = \frac{360(n-1)}{365} \frac{\pi}{180}$$

Ogni grado angolare dell'equazione del tempo corrisponde a 4 minuti di tempo.

Per vedere l'effetto cumulativo del ritardo o anticipo giornaliero si somma algebricamente l'anticipo o ritardo giornaliero ottenendo la curva sottostante, da cui si verifica che l'errore massimo che si può commettere è di 16 minuti, il 2 di novembre.



Ora solare vera

Come noto, l'ora convenzionale vale esattamente solo per le località che si trovano sul meridiano di riferimento; ciò significa che se la località in esame si trova a est del meridiano, quando l'orologio segna mezzogiorno il Sole ha già superato il suo punto più alto, e viceversa nel caso in cui si trovi a ovest.

Infine se il paese adotta l'ora legale, portando avanti di una ora le lancette a marzo e indietro di una ora a ottobre, come in Italia, va apportata una ulteriore correzione all'ora solare.

L'ora solare vera (osv) è quindi ottenuta con l'espressione correttiva:

$$osv = ora\ civile + \Psi + 4(\varphi - L_{std}) + correz\ ora\ legale$$

Dove:

- Ψ = Equazione del Tempo
- L_{std} è la longitudine del meridiano di riferimento per l'ora convenzionale, per l'Italia è il meridiano Europa centrale la cui longitudine è 15° Est;
- φ è la longitudine della località in esame

Altezza del sole

Noti la declinazione, l'angolo orario e la latitudine della località in esame, l'altezza del sole sull'orizzonte, ovvero l'angolo formato tra la direzione dei raggi solari ed il piano orizzontale, si calcola mediante la relazione:

$$\alpha = 90 - \theta_z \quad [^\circ]$$

in cui α è complementare a θ_z , l'angolo zenitale del sole, ovvero l'angolo formato tra i raggi solari e la direzione dello zenit, secondo la relazione:

$$\cos \theta_z = \sin \alpha = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega$$

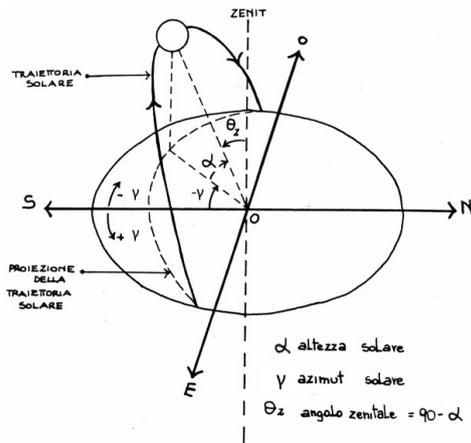
Dove:

- δ declinazione
- φ latitudine
- ω angolo orario

Mentre l'angolo azimutale del sole, ovvero l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud, positivo se la direzione cade

verso est, negativo se cade verso ovest, dopo il mezzogiorno solare, si ricava dalla relazione:

$$\text{sen } \gamma = (\cos \delta \text{ sen } \omega) / \cos \alpha$$



Calcolo Alba e tramonto

Mediante la declinazione solare e la latitudine della località in esame è possibile determinare l'angolo orario al sorgere (o al tramontare) del sole ω_s , attraverso la relazione:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad [^\circ]$$

da cui si ricava la durata D del giorno in ore:

$$D = 2\omega_s / 15 \quad [h]$$

e l'ora O_a in cui sorge e tramonta O_t il Sole:

$$\text{Ora alba} \quad O_a = 12 - D/2 \quad [h]$$

$$\text{Ora tramonto} \quad O_t = O_a + D \quad [h]$$

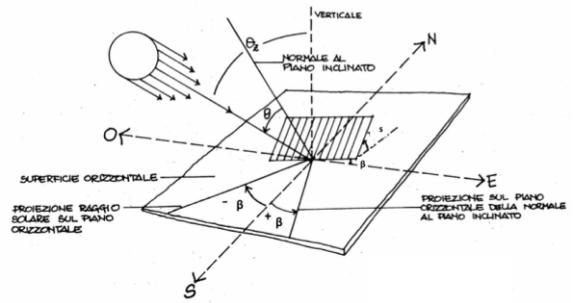
3. Calcolo della posizione del sole relativa a superfici di diversa inclinazione e orientamento

Per determinare la posizione del Sole rispetto a una superficie qualunque è necessario definire l'inclinazione della stessa s (angolo di tilt), cioè l'angolo formato con l'orizzontale, e l'orientamento β , ovvero l'angolo azimutale formato fra il piano verticale che contiene la normale alla superficie e la direzione sud.

Con la convenzione che la superficie ha azimut positivo per la direzione est e negativo affacciata verso la direzione ovest; si assume azimut 0° quando la superficie si affaccia esattamente a sud.

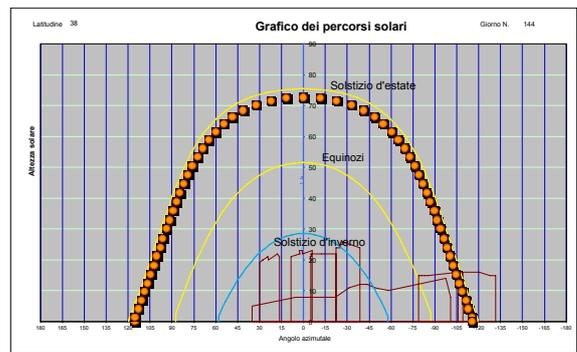
Determinati tilt e azimut è possibile ricavare l'angolo di incidenza, θ_t , formato tra la normale alla superficie e la direzione dei raggi solari, grazie alla relazione:

$$\cos \theta_t = \cos s \cos \theta_z + \text{sen } s \text{ sen } \theta_z \cos(\gamma - \beta)$$



Utilizzando le espressioni in precedenza determinate, si possono costruire dei grafici per la determinazione della posizione del Sole sulla volta celeste, ovvero dei diagrammi dei percorsi solari in cui è possibile leggere con facilità altezza e azimut del Sole alle diverse ore del giorno di ciascun mese dell'anno.

Nella figura sottostante un esempio di diagramma solare calcolato il 23 maggio per una località con latitudine 38° N.



4. Radiazione solare

Il sole irradia energia dall'interno del nucleo poiché avvengono continuamente delle reazioni di fusione termonucleare che convertono massa in energia.

Si calcola che la potenza totale sviluppata dal sole è $P_s = 3,845 \times 10^{20}$ MW, da cui si ricava l'irraggiamento alla superficie solare di $63,17 \text{ MW/m}^2$.

La costante solare

La costante solare, I_{sc} ovvero l'energia irraggiata dal sole nell'unità di tempo su di una superficie unitaria della terra al di sopra dell'atmosfera, in direzione normale alla direzione dei raggi solari è data da un intervallo tra $1325\text{-}1417 \text{ W/m}^2$.

La variazione di I_{sc} dipende da vari fenomeni, tra cui il più importante è la variazione della distanza sole terra che è massima nel solstizio d'estate e minima nel solstizio d'inverno.

Della costante solare I_{sc} , sono disponibili in letteratura le seguenti misure:

$$I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2: \text{NASA, 1971}$$

$$I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2: \text{WRC, 1981}$$

Nei calcoli considereremo il valore medio WRC pari a $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$.

La radiazione solare extra-atmosferica sul piano orizzontale

Considerato che l'orbita terrestre è eccentrica, la distanza Terra-Sole varia nel corso dell'anno. Una superficie posta lungo l'orbita terrestre risente di questa variazione e di conseguenza l'energia incidente sulla superficie normale ai raggi solari I_{en} può essere calcolata, giorno dopo giorno, mediante la seguente relazione approssimata che tiene conto del fattore di correzione per l'eccentricità dell'orbita:

$$I_{en} = [1 + 0,033 \cos(360 n / 365)]$$

dove:

n = progressivo numero dei giorni dell'anno ($n=1 \dots 365$)

Se ci troviamo in una località qualunque della Terra lungo un parallelo di latitudine ϕ , una superficie orizzontale posta oltre l'atmosfera riceverà una intensità della radiazione solare dipendente dall'angolo di incidenza dei raggi solari, i quali variano a causa della variazione della declinazione e della rotazione della Terra intorno al proprio asse. L'intensità I_0 della radiazione solare extra-atmosferica incidente su una superficie orizzontale che si muove solidale con la Terra è determinata dalla seguente relazione:

$$I_0 = I_{en} \cos(\Theta_z)$$

per cui:

$$I_0 = I_{en} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega)$$

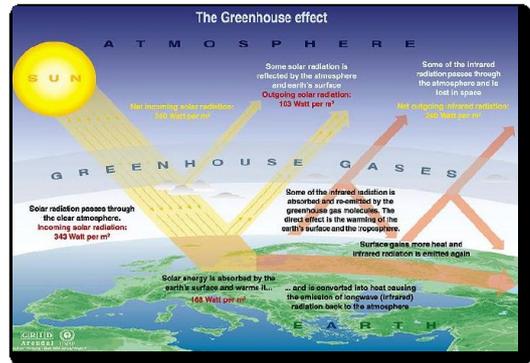
La radiazione solare al suolo

Una considerevole frazione delle radiazioni solari che giunge nella parte superiore dell'atmosfera viene da essa assorbita e riflessa, cosicché solo il 51% circa della radiazione solare complessiva riesce a raggiungere la superficie terrestre.

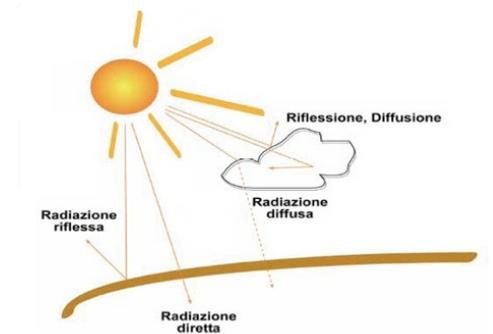
La radiazione solare al suolo globale somma dei contributi di radiazione diretta, diffusa e riflessa, è il flusso di energia, sotto forma di onde elettromagnetiche, che raggiunge la superficie terrestre ed è misurata generalmente in W/m^2 . Serie temporali di radiazione solare al suolo stimata si possono trovare sull'Atlante Italiano della Radiazione Solare dell'ENEA.

Le radiazioni assorbite dal suolo riscaldano la Terra, che a sua volta, irradia energia verso l'esterno sotto forma di onde elettromagnetiche (infrarossi). La frazione di potenza termica assorbita dall'atmosfera viene a sua volta riemessa in parte verso l'esterno e in parte verso il suolo terrestre, ulteriormente riscaldato anche da questa frazione di radiazione. L'atmosfera quindi impedisce la dispersione delle radiazioni emesse dal suolo, fenomeno noto come "effetto serra".

Nella figura sottostante il Bilancio termico dell'atmosfera.



Si può riassumere che la radiazione solare globale al suolo si compone di tre parti principali: la radiazione diretta, ovvero quella che trasmessa arriva a terra in linea con il disco solare; la radiazione diffusa, ovvero la quota di radiazione che subisce l'attenuazione del flusso diretto a causa dell'assorbimento e della riflessione dell'atmosfera; la radiazione riflessa, ovvero la parte di radiazione che risente delle caratteristiche del terreno circostante (albedo).



5. Stima della radiazione diretta e diffusa su superfici orizzontali

Come in premessa descritto, è oramai frequente trovare serie storiche di radiazione solare globale misurata al suolo anche con stazioni di rilevamento amatoriali. La misura più o meno accurata (l'accuratezza dipende dal tipo di sensore, dalla sua manutenzione e calibrazione) della radiazione globale sul piano orizzontale I , quindi, può essere nota.

Poiché l'energia solare che raggiunge la terra, a causa dei fenomeni di diffusione e d'assorbimento prodotti dai costituenti dell'atmosfera sulla radiazione solare, è minore dell'energia incidente su una superficie posta ipoteticamente all'esterno dell'atmosfera, il metodo valuta, per ogni valore di radiazione extratmosferica I_0 , l'indice di luminosità K_t , che esprime il valore percentuale della quantità d'energia solare arrivata al suolo:

$$K_t = \frac{I}{I_0}$$

Quando la radiazione diffusa non è direttamente misurata, può essere stimata attraverso l'indice di

nitidezza ovvero la frazione della radiazione diffusa sulla globale sul piano orizzontale,

$$K_d = \frac{I_d}{I}$$

Tale rapporto è funzione dell'indice di luminosità (o nuvolosità per altri), K_t .

Modelli di regressione

In letteratura sono presenti svariati modelli per valutare la componente diffusa implementati nel tempo, da vari autori e calcolati per diverse località nel mondo. Quelli ricavati per l'area mediterranea trattano i dati medi mensili piuttosto che singoli valori giornalieri o orari.

Per la ricerca di tali indici si è scelto di operare con modelli di regressione operanti mediante equazioni che forniscono l'indice di nitidezza del cielo K_d , in funzione dell'indice di luminosità K_t , che potessero soddisfare la valutazione di dati orari.

Di seguito un elenco, certamente non esaustivo.

- Orgill e Hollands (1977), basato sui dati raccolti a Toronto in Canada
- Karatasou (2001), modello che si esprime tramite un polinomio di terzo grado ottenuto in base ai dati rilevati ad Atene in Grecia
- Reindl (1990), basato su dati sperimentali di località europee e statunitensi
- Boland (1984), modello che utilizza un polinomio di primo grado, utile quindi per stime di massima, ottenuto utilizzando le rilevazioni fatte a Vittoria in Australia.
- Boland (2001), a differenza del modello proposto nel 1984 questo modello assume una forma esponenziale.
- Miguel (2001), modello ottenuto dalla combinazione di molteplici serie di dati relative all'estremità settentrionale della fascia mediterranea.
- Soares (2004), ottenuto dall'elaborazione dei dati rilevati a San Paolo in Brasile
- Macagnan et al. (1994), correlazioni che tengono conto dell'altezza solare tra i valori orari di radiazione diffusa e i corrispondenti valori globali

Correlazioni di Erbs et al. (1982).

Per la stima della radiazione diffusa, introdotta nel modello di calcolo semplificato proposto, si sono scelte le correlazioni di Erbs et al. il quale propone un modello di regressione dei dati sperimentali relativi all'indice di luminosità K_t e la frazione diffusa K_d , basato su misure sperimentali in varie località degli Stati Uniti, secondo le relazioni:

$$K_d = 1,0 - 0,09 K_t, \quad \text{per } 0 \leq K_t \leq 0,22$$

$$K_d = 0,9511 - 0,1604 K_t + 4,388 K_t^2 - 16,638 K_t^3 + 12,336 K_t^4 \quad \text{per } 0,22 < K_t \leq 0,80$$

$$K_d = 0,165 \quad \text{per } K_t > 0,80$$

Stimata la frazione della radiazione diffusa sul piano orizzontale, si ricava la radiazione solare diffusa corrispondente dalla globale,

$$I_d = K_d I \quad [W/m^2].$$

Mentre la radiazione diretta sul piano orizzontale si ricava per sottrazione dalla globale,

$$I_b = I - I_d \quad [W/m^2].$$

Naturalmente bisogna tenere conto se l'angolo azimutale del sole γ cade prima dell'alba oppure oltre il tramonto, condizioni in cui la radiazione diretta si annulla, ma possono permanere, anche se di modesti valori, le altre componenti (diffusa e riflessa) della radiazione nelle ore di crepuscolo mattutino e serale.

6. Stima delle componenti la radiazione su superfici di diversa inclinazione e orientamento

Noti l'inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale e l'azimut della stessa rispetto alla direzione sud, come descritto in precedenza, è possibile ottenere le tre componenti della radiazione solare che la superficie in questione capta considerando un modello di distribuzione isotropica della radiazione diffusa secondo gli studi condotti da Hottel e Woertz (1942) e Liu e Jordan (1960): il modello assume che tutta la radiazione diffusa sia uniformemente distribuita sulla volta celeste e che la riflessione del terreno sia diffusa.

Il coseno dell'angolo d'incidenza, θ_t , formato tra la normale alla superficie e la direzione dei raggi solari è dato da:

$$\cos \theta_t = \cos s \cos \theta_z + \sin s \sin \theta_z \cos(\gamma - \beta)$$

permette di calcolare la radiazione solare diretta captata dalla determinata superficie, secondo la relazione:

$$I_{bt} = I_b \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_z} \quad [W/m^2];$$

in cui:

$\frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_z}$, rappresenta il rapporto (R_b) tra la radiazione solare diretta sulla superficie in oggetto e quella sull'orizzontale.

Mentre la relazione per ricavare la radiazione solare diffusa è data da:

$$I_{dt} = I_d F_v \quad [W/m^2];$$

in cui:

$F_v = \left(\frac{1 + \cos s}{2}\right)$, rappresenta il fattore di vista della volta celeste da parte della superficie in oggetto.

La radiazione solare riflessa su detta superficie, si ottiene

$$I_{rt} = \rho I F_c \quad [W/m^2].$$

Dove:

il coefficiente di albedo (ρ), è parametro adimensionale che indica la frazione della radiazione globale che viene riflessa dall'ambiente circostante sulla superficie in analisi, fissato a seconda delle condizioni del terreno a contorno;

$F_c = \left(\frac{1-\cos\theta}{2}\right)$ rappresenta il fattore di vista del contesto circostante, da cui proviene la radiazione riflessa.

Di seguito una tabella che mostra i coefficienti di albedo per seconda del tipo di ambiente a contorno.

Superficie	Indice
Strade terrate	0,04
Bosco di conifere in inverno	0,07
Superfici d'acqua	0,07
Asfalto invecchiato	0,10
Superfici di bitume e ghiaia	0,13
Tetti terrazze di bitume	0,13
Suolo	0,14
Erba secca	0,20
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Bosco in autunno	0,26
Erba verde	0,26
Pareti di edifici scuri	0,27
Foglie morte	0,30
Ghiaia	0,60
Pareti di edifici chiari	0,60
Bosco innevato	0,72
Neve	0,75

La radiazione solare globale captata su una superficie inclinata e diversamente orientata risulta dalla somma delle tre componenti, diretta, diffusa e riflessa in precedenza empiricamente calcolate dalla radiazione solare globale misurata sul piano orizzontale:

$$I_t = I_{dt} + I_{bt} + I_{rt} \quad [W/m^2].$$

7. Modello energetico semplificato per la simulazione della produzione da impianti fotovoltaici

Il passo successivo del codice di calcolo è simulare la potenza generata da un impianto fotovoltaico di determinata potenza nominale, in modo da poter valutare i flussi energetici scambiati tra utilizzatore e rete.

La produzione di energia di un impianto fotovoltaico è certamente legata alla radiazione solare incidente captata e da una serie di altri fattori, meno rilevanti che ne influenzano il comportamento. Le condizioni meteorologiche quindi impattano direttamente sulla producibilità di questa tipologia di impianto.

Al fine di prevedere la produzione oraria degli impianti fotovoltaici occorre quindi avere delle stime di irraggiamento riferite al luogo in cui sono situati.

Supponendo di avere ben noto questo dato in corrispondenza del piano dei moduli, occorre poi poter stimare la produzione dei moduli stessi e dell'intero

impianto, il quale include il sistema di conversione dell'energia ed i cavi di collegamento.

In letteratura sono disponibili diversi modelli matematici che descrivono la produzione fotovoltaica in funzione dei dati meteo, in particolare, nell'ambito della simulazione prevista dal portale www.energiacnr.it ne è stato scelta una funzione dell'irraggiamento e di altri parametri ambientali.

Il metodo si basa su un modello non lineare che tiene conto oltre che dell'irraggiamento anche dell'efficienza del modulo in funzione della sua temperatura di esercizio, stimata a partire dalla conoscenza della temperatura dell'aria ambiente e della velocità del vento.

Questo modello effettua una stima di produzione basandosi sulla tipologia e sulla potenza nominale dei moduli fotovoltaici che compongono l'impianto, secondo la formula:

$$P_{out} = P_{stc} \frac{I_t}{G_{stc}} \eta_{rel}(G', T')$$

dove:

P_{out} , rappresenta la potenza generata dall'impianto fotovoltaico nelle condizioni reali di esercizio;

P_{stc} , rappresenta la potenza nominale dell'impianto fotovoltaico;

$G_{stc} = 1000 \frac{W}{m^2}$ è il valore convenzionale di irradianza alle condizioni STC

La precedente formula, come detto, tiene conto dell'efficienza relativa, η_{rel} funzione dell'irraggiamento I_t captato dal modulo e della temperatura di esercizio dello stesso. Non si ha quindi necessità di conoscere l'efficienza nominale, η_{nom} dei moduli che, come noto, è calcolata alle condizioni di misura STC, Standard Test Conditions (1000W/m² di irradianza solare e ad una temperatura dei moduli di 25°C).

L'efficienza relativa $\eta_{rel}(G', T'_m)$ è data dal modello non lineare:

$$\eta_{rel}(G', T'_m) = 1 + k_1 \ln(G') + k_2 \ln(G')^2 + k_3 T'_m + k_4 T'_m \ln(G') + k_5 T'_m \ln(G')^2 + k_6 T'_m^2$$

dove:

i coefficienti $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ sono stimati in base a dati sperimentali ricavati presso il JRC di Ispra e dipendono dal tipo di tecnologia del pannello (C-Si, CIS, CdTe). Per i moduli in silicio cristallino i valori dei coefficienti sono riassunti nella tabella sottostante.

	C-Si
k1	-0,001716
k2	-0,040289
k3 [°C-1]	-0,004681
k4 [°C-1]	0,000148
k5 [°C-1]	0,000169
k6 [°C-1]	0,000005

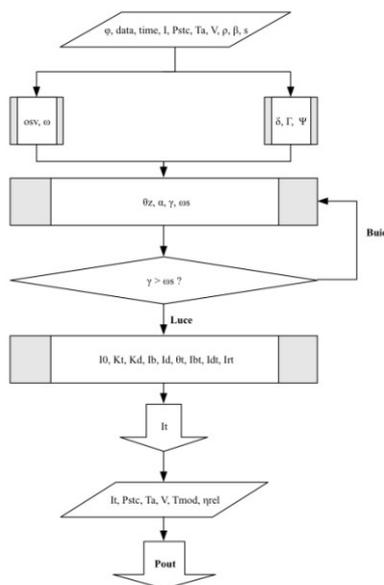
$G' = \frac{I_t}{G_{STC}}$, numero adimensionale quale rapporto delle due radiazioni,

$T'_m = T_{mod} - T_{modSTC}$, ovvero la differenza tra la temperatura di esercizio del modulo T_{mod} e la temperatura del modulo in condizioni STC.

La difficoltà di misura della temperatura del modulo è affrontabile in buona approssimazione tenendo conto delle condizioni climatiche a contorno. La temperatura T_{mod} infatti, è esplicitabile in funzione principalmente dei parametri ambientali quali radiazione solare I_t , temperatura ambiente T_a e velocità del vento V , secondo la relazione:

$$T_{mod} = 0,943T_a + 0,028I_t - 1,528V + 4,3$$

Di seguito la flow chart dell'intero processo.



8. Conclusioni

Il metodo di estrazione delle componenti la radiazione solare e il calcolo della potenza generata da un ipotetico impianto fotovoltaico, posizionato nello stesso sito della stazione meteorologica che acquisisce i dati di input, è usato nella sezione “Simulatore fotovoltaico” del portale www.energia.cnr.it del progetto CNR ENERGY+.

Seppur semplificato, il metodo qui presentato offre il vantaggio di basarsi sui soli valori reali di radiazione solare globale sul piano orizzontale, misurati dalle stazioni meteorologiche installate presso alcune sedi del CNR e ricava la radiazione solare globale captata dal piano dei moduli fotovoltaici in funzione degli indici di luminosità, K_d e di nitidezza, K_t .

In particolare quest'ultimo, fortemente dipendente dallo stato del cielo nella località in esame (torbidità

dell'aria, umidità, inquinamento, particolato, venti, ecc.), è argomento di attenzione in numerosi studi.

Aldilà, quindi, della precisione dei calcoli astronomici per ricavare gli angoli che identificano la posizione apparente del sole nel cielo, maggiore attenzione deve porsi sulla scelta dell'algoritmo per ricavare l'indice di nitidezza a partire dai valori di K_t . In questa trattazione si è scelto di usare il modello di regressione di Erbs et al, ma basato su misure sperimentali fatte in varie località degli Stati Uniti.

Considerato che sul territorio italiano, non si dispone di una rete capillare di sensori di radiazione solare che misurino tale parametro sia sul piano orizzontale, sia su piani inclinati e diversamente orientati, sviluppo di questo lavoro è l'esigenza di ricavare da dati sperimentali misurati sui siti delle stazioni del CNR, modelli di regressione riferiti alle stesse località di ubicazione delle stazioni meteorologiche, in modo da ottenere algoritmi per l'estrazione delle componenti la radiazione più prossime a quelle misurate con i sensori su campo.

Il modello di calcolo semplificato, opportunamente affinato anche nella ricerca della funzione dell'efficienza relativa $\eta_{rel}(G', T'_m)$ dei moduli, potrebbe essere adottato per ricondurre alle previsioni, in base alle previsioni meteorologiche e allo stato del cielo, della potenza generata da un impianto fotovoltaico posizionato nello stesso sito della stazione meteorologica.

Nomenclatura

n	giorno dell'anno (1...365)
d	giorno del mese
δ	declinazione
L_{std}	Longitudine standard (Italia è 15° Est)
φ	Latitudine geografica (est -; ovest +)
Γ	angolo giornaliero
Ψ	Equazione del tempo
osv	ora solare vera
ω	angolo orario
θ_z	Angolo zenitale del sole
α	altezza del sole
γ	Angolo azimutale del sole
ω_s	angolo orario al sorgere (o al tramontare) del sole
D	durata del giorno
I_{sc}	costante solare
I_0	radiazione solare extra-atmosferica
I	radiazione solare globale sul piano orizzontale
K_t	indice di luminosità
K_d	indice di nitidezza
I_b	radiazione solare diretta sul piano orizzontale
I_d	radiazione solare diffusa sul piano orizzontale

θ_t	Angolo d'incidenza tra la normale alla superficie e la direzione dei raggi solari
β	azimut della superficie captante
s	inclinazione della superficie captante (tilt)
ρ	coefficiente di albedo
I_{bt}	radiazione solare diretta sul piano inclinato e diversamente orientato
I_{dt}	radiazione solare diffusa sul piano inclinato e diversamente orientato
I_{rt}	radiazione solare riflessa sul piano inclinato e diversamente orientato
I_t	radiazione solare globale sul piano inclinato e diversamente orientato
P_{out}	Potenza generata dall'impianto fotovoltaico nelle condizioni reali di esercizio
P_{stc}	Potenza nominale dell'impianto fotovoltaico in condizioni STC
G_{stc}	Valore convenzionale di irradianza alle condizioni STC ($G_{stc} = 1000 \frac{W}{m^2}$)
η_{rel}	Efficienza relativa
η_{nom}	Efficienza nominale
T_{mod}	Temperatura di esercizio del modulo
T_{modSTC}	Temperatura del modulo in condizioni STC (25°C)
T_a	temperatura ambiente
V	Velocità del vento

Bibliografia

- L'Equazione del Tempo - Costantino Sigismondi - Università di Roma "La Sapienza" e ICRA
- Astronomia; Formule e tabelle- Rodolfo Baggio - Milano, ottobre 2000
- Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrogeologici- ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
- Dossier ENEA per lo studio dei cambiamenti climatici e dei loro effetti - 2007
- Architettura e ambiente. Manuale per il controllo della qualità termica, luminosa e acustica degli edifici - F. M. Butera - ETASLIBRI
- Experimental testing of models for the estimation of hourly solar radiation on vertical surfaces at Arcavacata di Rende - M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos *, V. Marinelli - Solar Energy 81 (2007) 692-695

- Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes - Andrea Padovan, Davide Del Col - Solar Energy 84 (2010) 2068-2084
- Tesi di laurea: Valutazione dei modelli analitici di previsione della radiazione diffusa e incidenza sul comportamento delle pareti opache -Munaretto Carlo
- Tesi di Laurea Specialistica: Virtual Power System: coordinamento locale tra generazione e carico - Mirco De Fanti
- Tesi di Laurea: Analisi, realizzazione e verifica sperimentale di un sistema di raffreddamento a film d'acqua per pannelli fotovoltaici - Matteo Cazzola
- E. Skoplaki, J.A. Palyvos, Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. Renewable Energy 34 (2009) 23-29.
- Stime di generazione elettricità solare PVGIS, www.re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/
- Progetto CNR energy+: il network delle stazioni meteo - S. Di Cristofalo
- Deriving daylight frequency distribution curves from solar radiation data to be used to implement energy saving policies in Palermo, Italy - A. Fanchiotti, S. Di Cristofalo

Sitografia

- www.ecostylegroup.it
- www.solaritaly.enea.it
- www.energia.cnr.it
- www.re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/