EN Prog	EN etto Solare Termoo	linamico	1		Copia d	i
Class	ificazione SOL/RS/2	2007/21	Distribuz	zione Libe	ra	
Prog Ott	etto ica Sistema di Concenti	razione				
	La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell' <i>Atlante italiano della radiazione solare</i> por la pubblicazione dei dati					
	Francesco Spinelli, Euro Giovanni Cogliani, Augusto Maccari, Mauro Milone					
Son We do più tuz pia im Int	Sommario: Web e Internet, satelliti meteorologici, strumenti di misura a terra: ricorren- do a tecnologie differenti è possibile misurare e stimare in maniera sempre più accurata la radiazione solare che giunge al suolo. Per i propri scopi isti- tuzionali, ma anche per i tecnici che devono localizzare e progettare im- pianti di produzione dell'energia da fonte solare – che diventerà sempre più importante in futuro – l'ENEA ha allestito un archivio di dati e creato il sito Internet dell' <i>Atlante italiano della radiazione solare</i> .					
	Francesco Spinelli	17-dic-2007				
	Euro Giovanni Cogliani	17-dic-2007				
	Augusto Maccari	17-dic-2007				
1	Mauro Milone	17-dic-2007	Augusto Maccari	N	1. Vignolini	
Rev	Autori	Data	Convalida	Data A	pprovazione	Data

Progetto Solare Termodinamico

LISTA DI DISTRIBUZIONE

La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'*Atlante italiano della radiazione solare* per la pubblicazione dei dati

Libera



Indice

1.	Introduzione	4
2.	La radiazione solare	6
3.	La stima della radiazione solare mediante le immagini satellitari 3.1. Il modello 'Heliosat'. L'archivio storico 1994-'99 3.2. Il modello 'Solarmet' 3.3. Il nuovo archivio ENEA delle mappe della radiazione solare	6 6 6 6
4.	La rete attinometrica ENEA-SOLTERM 4.1. Descrizione della stazione di acquisizione e trasmissione dati 4.2. Elaborazioni effettuate	6 6 6
5.	La previsione della radiazione solare diretta	6
6.	Il sito SolarItaly – Atlante italiano della radiazione solare	6
7.	Simboli usati	6
8.	Bibliografia	6
9.	Ringraziamenti	6



1. Introduzione

Prometeo scelse per gli uomini il dono più prezioso – il fuoco – e salì in cielo con una torcia per prenderlo dal Sole; i mitologi greci fanno compiere gesta *titaniche* ai loro eroi, ma in questo caso l'impresa poteva essere evitata: il fuoco del Sole giunge regolarmente sulla Terra sotto forma di raggi (elettromagnetici) e l'uomo del Duemila deve applicarsi a compiti diversi ma non meno impegnativi: misurare la radiazione solare, scoprirne natura e fenomenologia, inventare tecnologie per utilizzarla.

La radiazione solare è la fonte principale del 'sistema energetico' della Terra (l'altra è costituita dal calore prodotto per decadimento radioattivo all'interno del pianeta) e dunque è alla base di tutti i cicli naturali e le manifestazioni della vita, comprese le molteplici attività antropiche. La conoscenza di come la radiazione viene intercettata – assorbita o deviata – dallo strato atmosferico che avvolge la Terra, della frazione di essa che invece riesce a raggiungere direttamente il suolo e, infine, di quella che vi arriva da tutte le direzioni dopo aver subito uno o più urti con le molecole dell'atmosfera, sono presupposti sia alla comprensione dei fenomeni naturali legati al clima e alla meteorologia, sia – più utilmente – alla localizzazione e progettazione degli impianti che sfruttano l'energia solare: infatti il ricorso a nuove forme di energie rinnovabili, fra cui quella solare, diventerà in futuro sempre più necessario se si vuol garantire all'umanità un fabbisogno energetico adeguato e contemporaneamente scongiurare gli effetti dannosi per l'ambiente conseguenti all'uso in vasta scala dei combustibili fossili.

In ENEA l'attività di raccolta, archiviazione e pubblicazione dei dati di radiazione è iniziata sin dagli anni Novanta del secolo scorso e prosegue tuttora. I metodi di acquisizione adottati sono due: il primo consiste nello stimare il dato radiativo a partire da immagini satellitari di copertura nuvolosa, il secondo nella installazione di centraline di misurazione (acquisizione) a terra, essenzialmente in siti individuati dall'ENEA perché suscettibili di ospitare gli impianti previsti nel suo Programma Solare Termodinamico. Sia le stime che le misure di radiazione sono confluite in un consistente archivio utilizzato per studi di caratterizzazione regionale del clima e per calcoli in cui i dati di radiazione sono di input (dimensionamento di impianti ecc.). Recentemente, al precedente lavoro di pubblicazione dei dati (su supporto cartaceo [5], ma anche attraverso il sito Internet dell'Archivio Climatico ENEA-DBT [1]) è stato aggiunto un nuovo strumento: la creazione del sito Internet SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare [2]. Il nuovo sito offre la possibilità di calcolare la radiazione al suolo per qualunque località, non solo sul piano orizzontale, ma anche per superfici comunque orientate (si pensi alle facciate vetrate degli edifici, ma anche agli impianti in cui la superficie captante è orientata per massimizzare l'energia raccolta o si muove continuamente per 'inseguire' i raggi del Sole durante il suo percorso diurno). Nella versione definitiva il sito conterrà anche una sezione archiviale (data-base sulla radiazione solare costituito da mappe e serie storiche di misure prodotte dall'ENEA) e un 'tool' per la stima della quantità di radiazione "attesa" al suolo nei giorni successivi sulla base delle previsioni meteo. In questo articolo è data una breve rassegna



dell'attività condotta sinora e vengono descritti i prodotti (archivi, programmi di calcolo) messi a disposizione della comunità scientifica e dei tecnici, gli strumenti (tecnologie, siti Internet) approntati allo scopo e infine le modalità con cui tali prodotti e strumenti possono essere fruiti e utilizzati.



La radiazione solare 2.

Come conseguenza delle reazioni nucleari che avvengono al suo interno, il Sole irradia isotropicamente nello spazio radiazione elettromagnetica il cui spettro in lunghezza d'onda corrisponde a quella dell'emissione di un corpo nero avente temperatura esterna pari a 5780 K (gradi Kelvin). La potenza irradiata è enorme, stimabile in poco meno di $4 \cdot 10^{26} W$ (watt); quella che attraversa una data superficie – per comodità pensiamo momentaneamente ad un pannello piano posizionato al di fuori dell'atmosfera terrestre - dipende dalla sua dimensione (area), dalla distanza dall'astro e infine dall'orientazione rispetto a quest'ultimo. Per una superficie posta alla distanza media Sole-Terra, perpendicolarmente alla direzione di propagazione dei raggi, si ha:

 $\dot{I}_{sc} = 1366.9 W / m^2$ (vedi nota ¹).

La quantità I_{sc} è detta costante solare; per farsi un'idea della sua entità si consideri che una superficie di estensione pari a circa $60 km^2$ (vedi nota ²) riceve l'intera potenza elettrica installata in Italia, che ammonta a poco più di 80000 MW.

Nelle situazioni comuni i dispositivi che raccolgono l'energia solare sono posti a livello del suolo, sia che si tratti della superficie captante dei pannelli fotovoltaici o termici, sia che ci si riferisca agli specchi riflettenti di un impianto solare a concentrazione. In tutti questi casi l'irradianza disponibile è inferiore a quella presente al di fuori dell'atmosfera in quanto intervengono fattori che globalmente determinano un effetto netto attenuativo (figura 2):

a) nell'attraversare l'atmosfera una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (scattering) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapor acqueo, le nubi e gli aerosol). L'attenuazione interessa tutte le lunghezze d'onda dello spettro, però in maniera differenziata, per cui lo spettro elettromagnetico risultante assume un profilo irregolare (figura 1). La radiazione solare diretta, ossia quella costituita dai soli raggi che attraversano lo spessore atmosferico senza esserne perturbati,

 $I = I_n \cos \vartheta$

Nel testo si userà anche irraggiamento come sinonimo di irradianza.

¹ Tecnicamente la potenza radiante che incide sull'unità di superficie si chiama irradianza ed è esprimibile in W/m^2 . La definizione non richiede che la superficie 'investita' dall'energia trasportata dai raggi sia disposta perpendicolarmente a questi ma, ovviamente, quando ciò accade l'irradianza è massima a parità di tutte le altre condizioni; infatti, se I_n è la irradianza sul piano perpendicolare ai raggi, quella su di un piano la cui normale forma l'angolo ϑ con la direzione dei raggi varrà:

² Ossia un quadrato 7.7 km di lato, meno di un cinquemillesimo dell'intero territorio italiano. Seguendo la convenzione scientifica, in questo articolo la parte decimale dei numeri non interi è preceduta dal punto.



arriva al suolo da una direzione che, essendo determinata dalla posizione del Sole nella volta celeste, cambia continuamente durante l'intervallo diurno;

b) la frazione della radiazione solare che invece urta le molecole dell'atmosfera, se non assorbita, è deviata in tutte le direzioni: parte si allontana verso lo spazio e parte raggiunge il suolo in un secondo momento: quest'ultima è detta radiazione solare diffusa e, ovviamente, proviene da tutte le direzioni dell'emisfero celeste;

La radiazione solare globale che investe una superficie disposta orizzontalmente è data dalla somma delle componenti diretta e diffusa; se invece è inclinata, alle prime due si aggiunge una terza componente rappresentata dalla radiazione solare riflessa dal suolo. Per stimarne l'entità, occorre tener conto del fatto che dal punto di vista della riflessività i 'tipi di suolo' si comportano in maniera differente l'uno dall'altro: ad esempio, riflettono di meno le superfici d'acqua, gli asfalti stradali e i boschi di conifere in inverno (meno del dieci per cento della radiazione che ricevono), molto di più i manti nevosi e le superfici chiare degli edifici (più del sessanta per cento). Il contributo della radiazione riflessa è comunque molto più piccolo rispetto agli altri due (vedere l'esempio di figura 3).



Figura 1 - Spettro dell'irradianza solare in funzione della lunghezza d'onda. La curva più alta si riferisce al profilo rilevabile al top dell'atmosfera: è all'incirca quella di emissione di un corpo nero alla temperatura di 5780 K (il Sole); i lievi scostamenti rispetto al profilo regolare del corpo nero sono dovuti all'assorbimento da parte delle molecole e degli atomi vaganti nello spazio extrastellare (idrogeno ecc.). La curva più bassa, invece, si riferisce al profilo riscontrabile al livello del suolo: le irregolarità e l'attenuazione sono più pronunciate a causa delle numerose molecole dello strato atmosferico che assorbono i raggi in maniera selettiva: se gli aerosol assorbono in modo quasi uniforme a tutte le lunghezze d'onda, particolari molecole (ossigeno, anidride carbonica, ozono ecc.) sono responsabili dei picchi all'ingiù in corrispondenza di particolari lunghezze d'onda.

ENER Procetto Coloro Termo dinamico	SOL/RS/2007/21	Pag 8 di 45
Frogetto Solare Termodinamico	Distr. LIBERA	



Figura 2 – Scomposizione della radiazione al suolo nelle sue componenti. Per una superficie O posta orizzontalmente, la radiazione *globale* è data dalla somma delle componenti *diretta* e *diffusa*; nel caso di superficie inclinata S rispetto al piano orizzontale, alle due componenti diretta e diffusa si aggiunge quella *riflessa* dal suolo.

ENEN Bragatta Salara Tarma dinamian	SOL/RS/2007/21	P_{ag} 9 di 45
rogetto Solare Termodifiantico	Distr. LIBERA	



Figura 3 – Profilo annuale della radiazione giornaliera media mensile (Rgmm): medie pluriennali. I valori si riferiscono alla località di Roma (latitudine=41°54′ Nord, longitudine=12°29′ Est rispetto a Greenwich), per una superficie orientata a Sud e inclinata di 30° rispetto al piano orizzontale. Il grafico mostra l'incidenza relativa delle frazioni *diretta, diffusa* e *riflessa* della radiazione *globale* al suolo; l'andamento della radiazione *extra-atmosferica*, sempre relativo ad una superficie con uguale orientazione, è stato aggiunto per mettere in evidenza l'entità dell'attenuazione per effetto dell'attraversamento dello strato atmosferico.

Ai fini pratici e progettuali, hanno interesse altre grandezze derivate da quelle appena descritte, in particolare le quantità di energia ricevuta in intervalli prestabiliti di tempo: radiazione *oraria, giornaliera, mensile, giornaliera media mensile, annua*, medie su più anni³. Inoltre per certe applicazioni, come gli impianti solari a concentrazione, un'altra grandezza di estremo interesse è il *profilo giornaliero* (ora per ora) della radiazione diretta. Le prestazioni di tali impianti, che utilizzano il solo irraggiamento diretto, sono infatti influenzate non solo dal valore cumulativo dell'energia incidente sul piano di raccolta, ma anche dalla distribuzione delle intensità, ed anche il dimensionamento dei sistemi di accumulo, necessario per compensare i momenti di disallineamento fra periodi di disponibilità e domanda di energia, è funzione del profilo orario di irraggiamento. Affinché le stime

³ 'radiazione oraria' è espressione consolidata per la quantità di energia radiante (solare) che incide sull'unità di superficie in un'ora (altri preferiscono: *esposizione radiante oraria*); per definizione, è uguale all'integrale dell'irradianza sull'intervallo di un'ora. Lo stesso vale per le radiazioni giornaliera, annua ecc. Tutte queste quantità sono dimensionalmente equivalenti ad un'energia su superficie e pertanto si esprimono indifferentemente in megajoule al metro quadrato (MJ/m²) o chilowattora al metro quadrato (kWh/m²). 1 kWh/m² vale 3.6 MJ/m².



siano corrette il profilo deve essere realistico e deve essere calcolato per tutti i giorni dell'anno, in modo che si tenga conto della variabilità atmosferica dovuta ai fenomeni nuvolosi che possono accentuare l'attenuazione della radiazione diretta.



3. La stima della radiazione solare mediante le immagini satellitari

L'Italia, come la quasi totalità delle nazioni, soffre della carenza di mappe dettagliate di radiazione solare, carenza che diventa ancora più grave se si considera in particolare la componente diretta. Per ovviare a ciò, in ENEA la costruzione di mappe della radiazione solare è stata promossa a partire dai primi anni Novanta del secolo passato, dall'allora divisione dei Sistemi energetici per la mobilità e l'habitat e prosegue tuttora nell'ambito del Progetto Solare Termodinanico. L'attività è stata favorita dalla disponibilità crescente delle immagini ottenute dai satelliti meteorologici, le quali sono alla base dei modelli di stima della radiazione solare a partire da questa nuova fonte di dati.

I metodi adottati in ENEA si fondano sul trattamento delle immagini satellitari di copertura nuvolosa, simili a quelle utilizzate per le previsioni meteorologiche. Tali immagini mostrano la superficie del pianeta così come è vista dal satellite al momento della loro "cattura" e corrispondono a matrici numeriche i cui elementi (pixel) contengono un intero compreso nel range 0-255. Più precisamente, i sensori del satellite - puntato verso il pianeta - registrano punto per punto (pixel per pixel) l'intensità del raggio solare che viene riflesso dal pianeta e dunque forniscono una misura del coefficiente di riflessione (albedo) della superficie riflettente, che può essere uno strato di nubi, in caso di cielo coperto, oppure direttamente il suolo terrestre quando sussistono condizioni di cielo sereno (con quest'ultima affermazione si sta trascurando, in realtà, l'influenza dello strato atmosferico "sereno" attraversato dai raggi nei due percorsi diretto e riflesso). Nella restituzione grafica (su schermo o a stampa), in cui i valori da 0 a 255 sono resi mediante una scala di grigi, i valori più bassi, rappresentati con grigi tendenti al nero, corrispondono all'assenza di nubi, mentre i valori all'altro estremo della scala, contrassegnati da un grigio tendente al bianco, corrispondono alla presenza di nubi, tanto più spesse o numerose quanto più elevati sono i valori stessi (figura 4, immagine di sinistra).

Gli algoritmi messi a punto in ENEA, basati su opportuni modelli di comportamento dell'atmosfera, consentono di dedurre il dato di radiazione a partire da quello della copertura nuvolosa. Applicando tale procedura a ciascun pixel dell'immagine satellitare, si otterrà un nuova mappa di pari dimensioni (righe x colonne) che rappresenterà la grandezza calcolata (stimata), ossia la radiazione globale o diretta, riferita all'intervallo orario o un altro di durata differente. Per quanto riguarda i modelli per ricavare il dato di radiazione da quello di copertura nuvolosa, in ENEA ne sono disponibili due, Heliosat e il più recente Solarmet, entrambi descritti nel seguito con più dettaglio.

A partire da un congruo numero di mappe di radiazione oraria (calcolata indifferentemente con uno o l'altro dei due modelli), sarà possibile ricostruire l'intero profilo giornaliero della radiazione giunta al suolo e quindi stimare la radiazione (globale o diretta) per l'intero giorno, così pure derivare tutte le altre grandezze di interesse: la radiazione globale mensile o, dividendo per il numero di giorni, quella globale giornaliera media mensile, la radiazione annua e, con i dati disponibili per più anni, le mappe di radiazioni anni-tipo, mesi-tipo ecc., oppure i profili annuali medi (giorno x giorno) utili per caratterizzare una data località o l'intero territorio rappresentato in mappa. Infine, ricorrendo alle



leggi statistiche attestate in letteratura, si risale alle singole componenti della radiazione al suolo su piano orizzontale (ossia diffusa e diretta, se quest'ultima non è già fornita dall'algoritmo) e, sulla base di considerazioni geometriche, si possono riportare i valori su superfici comunque inclinate e orientate.

Affinché possano essere utilizzate per i calcoli e non solo per la visualizzazione grafica, la quale permette solo valutazioni per lo più qualitative, è essenziale che le mappe siano georeferenziate, ovvero si conosca il legame biunivoco fra coordinate geografiche di una generica località e posizione (riga e colonna) del pixel corrispondente in mappa⁴. E' intuibile il vantaggio della disponibilità di mappe rispetto alle misurazioni a terra: per motivi pratici queste ultime possono effettuarsi in un numero necessariamente limitato di stazioni mentre le prime - se correttamente georeferenziate - permettono di estrarne i dati virtualmente per qualunque località della superficie terrestre rappresentata.

3.1. Il modello 'Heliosat'. L'archivio storico 1994-'99

Come si è già accennato, in ENEA la produzione delle mappe della radiazione solare risale ai primi anni Novanta. Il metodo di calcolo adottato, denominato Heliosat, è stato sviluppato in Francia da Cano ed al. [3] e quindi adattato alla situazione italiana dall'ENEA [4] [5]. Poiché in assenza di nubi (ossia per condizioni di cielo sereno) il comportamento dell'atmosfera ai fini dell'attenuazione dei raggi solari che l'attraversano è ben caratterizzato, la variabilità della radiazione che giunge al suolo - una volta che si è tenuto in debito conto della posizione relativa fra Sole e Terra nei diversi periodi dell'anno e nei diversi momenti del giorno - è attribuibile in prima approssimazione alla minore o maggiore quantità di nubi presenti a causa delle condizioni meteorologiche del momento. In base a questa supposizione l'algoritmo richiede che venga calcolato un opportuno indice di copertura nuvolosa che si ottiene confrontando l'immagine 'attuale' del pianeta visto dal satellite, con una sua rappresentazione riferita a condizioni di cielo sereno; tale indice, correlato statisticamente con il coefficiente di trasmissione dei raggi solari attraverso l'atmosfera, permette di stimare la quantità di radiazione che giunge al suolo.

L'algoritmo in dettaglio. Più in dettaglio, la procedura per passare da un'immagine di copertura nuvolosa alla stima della radiazione globale consta dei seguenti passi principali:

⁴ La georeferenziazione, ossia la legge di trasformazione delle coordinate, determina il modo in cui la superficie terrestre - che è curva e non è sviluppabile in piano - viene deformata per poterla rappresentare sulla superficie piana della carta geografica. Oltre alla proiezione, una legge di trasformazione definisce automaticamente anche la scala della rappresentazione.

- normalizzazione dell'immagine. In sostanza, si corregge il valore di ciascun pixel per 'depurarlo' della dipendenza dalla posizione del Sole che varia da un'acquisizione all'altra durante il giorno e da un giorno all'altro durante l'anno. Questa operazione riporta tutte le immagini acquisite ad una medesima situazione virtuale in cui i raggi solari sono supposti arrivare a perpendicolo dopo aver percorso la distanza media Sole-Terra; inoltre essa è indispensabile per trattare in modo omogeneo immagini 'scattate' in istanti e condizioni differenti; l'immagine così ricavata è la mappa dell'albedo 'attuale' del pianeta;
- 2) costruzione della mappa di riflessione del pianeta in condizioni di cielo sereno (*albedo di riferimento*, figura 4, immagine di destra). Poiché in assenza di nubi l'atmosfera terrestre presenta caratteristiche stabili e uniformi, l'albedo di riferimento non dipende dagli accidenti meteorologici del momento, e le differenze fra i pixel dell'immagine sono direttamente riconducibili all'albedo del suolo terrestre, che cambia spostandosi da un punto all'altro (per questo motivo l'albedo di riferimento è anche detto non del tutto impropriamente *albedo del suolo*). Nella pratica l'albedo di riferimento di riferimento viene costruito effettuando la media sulle immagini normalizzate di un congruo numero di giorni contigui, scelti all'inizio del periodo temporale per il quale s'intende effettuare il calcolo, non prima di averne eliminato attraverso un procedimento di iterazioni successive le zone riconosciute via via come coperte dalle nubi; in seguito, a regime, l'albedo di riferimento viene aggiornato quotidianamente per tener conto della variabilità stagionale del suolo;
- 3) calcolo della mappa dell'*indice di copertura nuvolosa*. Pixel per pixel, la differenza fra i pixel (albedini) corrente ρ_t e del suolo ρ_{suolo} è una misura della frapposizione delle nubi all'istante di "cattura". In realtà nel modello si usa un indice di copertura nuvolosa adimensionale compreso fra zero e uno, dato da:

$$ICN = \frac{\rho_t - \rho_{suolo}}{\rho_{max} - \rho_{suolo}}$$

Esso è nullo quando, in condizioni di cielo sereno, si verifica $\rho_t = \rho_{suolo}$, mentre si ha *ICN* = 1 quando $\rho_t = \rho_{max}$. La definizione si completa scegliendo un valore costante per ρ_{max} , che deve corrispondere a quello di uno strato di nubi particolarmente intenso⁵;

4) si assume che tra il *coefficiente di trasmissione globale* dell'atmosfera K_T e l'indice *ICN* sussista una relazione funzionale:

 $K_T = f(ICN)$

 K_T è definito come il rapporto fra radiazione globale sul piano orizzontale al suolo e il corrispondente valore extra-atmosferico:

⁵ in realtà ρ_{max} viene definito in maniera leggermente differente ma i dettagli non sono importanti al fine del significato di ICN.

$$K_T = \frac{I}{I_a}$$

 I_o è una quantità che dipende esclusivamente dal giorno dell'anno, dall'ora a cui è riferita e dalla posizione geografica della località o del pixel: dunque si calcola in base a formule teoriche; nota I_o e ricavato il fattore K_T in funzione del valore dell'*ICN* fornito dalle immagini, si stima finalmente la radiazione globale al suolo, sul piano orizzontale, come prodotto $I = K_T I_o$.

E' possibile scegliere fra diverse particolarizzazioni del legame fra K_T e *ICN*; nella prima versione del metodo Heliosat si assume che sussista una relazione semplicemente lineare e i due parametri corrispondenti sono stimati statisticamente per regressione lineare, disponendo di misure indipendenti di K_T effettuate a terra negli stessi momenti della "cattura" delle immagini satellitari. Poiché di norma tali misure sono relative a intervalli orari, i parametri di K_T – e quindi anche le stime di *I* – si riferiscono allo stesso intervallo temporale. Ai fini della regressione statistica i valori di *ICN* devono essere estratti in corrispondenza delle località in cui si effettuano le misure a terra, individuate sulle mappe georeferenziate in base alle loro coordinate geografiche.



Figura 4 – Immagine satellitare di copertura nuvolosa e mappa dell'albedo di riferimento (o del suolo). Le due immagini sono dello stesso periodo; quella di sinistra è stata registrata dal satellite meteorologico in una giornata particolarmente nuvolosa e la regione italiana si intravede parzialmente sotto la coltre delle nubi.

<u>Attrezzature utilizzate e procedure</u>. Il sistema di calcolo ha utilizzato le immagini di copertura nuvolosa acquisite nello spettro visibile della radiazione elettromagnetica dal satellite *Meteosat* dell'*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT), con sede a Darmstadt (Germania). La ricezione in tempo reale delle immagini trasmesse dall'ente europeo, mediante lo stesso satellite adoperato per l'acquisizione, fu resa possibile in ENEA attivando un apposito sistema di ricezione composto da



un'antenna parabolica con convertitore di frequenza, un ricevitore VHF e un convertitore A/D). Il sistema di ricezione è stato attivato nel 1993 e dismesso a maggio del 2001.

Le immagini di nostro interesse sono costituite da "ritagli" di 400 righe per 512 colonne e includono l'intera regione italiana. Il dettaglio spaziale delle informazioni contenute nelle immagini dipende dalla superficie rappresentata dal singolo pixel che, per le nostre latitudini, corrisponde a quadratini di circa 2.5 km di lato: in questo modo si ottiene una "mappatura" abbastanza dettagliata dell'Italia e informazioni per qualsivoglia località.

Le immagini sono state ricevute con frequenza oraria e tutto il calcolo per la stima della radiazione globale oraria al suolo è stato fatto on-line fra due ricezioni consecutive. In questo modo è stato possibile archiviare anche l'immagine della radiazione giornaliera alla fine di ogni giorno e, per ogni mese, quella giornaliera media mensile.

Le misure a terra necessarie per calibrare i parametri della correlazione fra coefficiente di trasmissione e indice di copertura nuvolosa sono state fornite dall'Aeronautica Militare Italiana (dall'allora Servizio Meteorologico) e dal Ministero per le Politiche Agricole e Forestali, che gestisce la Rete Agrometeorologica Nazionale (RAN). La regressione ha riguardato più località, più momenti della giornata, più periodi dell'anno.

I risultati conseguiti e i prodotti ottenuti. L'archivio prodotto con il sistema Heliosat on-line è attualmente costituito dalle mappe [immagini] della radiazione globale giornaliera media mensile su piano orizzontale, dal 1994 al 1999 (72 mappe mensili). Dalle mappe georeferenziate sono stati estratti i dati mensili per 1614 località italiane selezionate in modo da includere tutti i comuni italiani con più di 10000 abitanti e comunque almeno uno, purché con popolazione maggiore di 5000 abitanti, in ogni porzione di territorio di 10×10 km². Sia le mappe sia le tabelle relative agli anni dal 1994 al 1999 sono stati pubblicati su supporto cartaceo [5] e sono pure liberamente 'scaricabili' collegandosi al sito Internet dell'Archivio Climatico ENEA-DBT [1].

I dati estratti dalle mappe archiviate sono stati utilizzati per studi e analisi geostatistiche, ad esempio nella caratterizzazione tipologica e regionale del clima italiano, e trovano pure applicazione nel settore civile, per la progettazione e dimensionamento degli edifici dal punto di vista termico e del risparmio energetico; inoltre le Amministrazioni Regionali e Locali si sono avvalse dei dati dell'Archivio Climatico ai fini della loro pianificazione energetica (formulazione di criteri per la ripartizione di fondi) e li hanno prescritti per il calcolo degli impianti solari e fotovoltaici ammissibili ai finanziamenti agevolati. Infine, l'archivio è utilizzato per fornire i dati di input ai calcoli on-line offerti nel sito Internet SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare (vedi oltre), sviluppato nell'ambito del Progetto Solare Termodinamico dell'ENEA.



3.2. Il modello 'Solarmet'

Da quando i satelliti meteorologici sono apparsi essere una pratica sorgente di dati, sono stati sviluppati molti modelli che stimano la radiazione solare dalle immagini da satellite. Tutti i modelli studiati sono riconducibili a due distinte categorie: quelli "statistici" e quelli "fisici".

Il metodo *Heliosat* descritto in precedenza rappresenta un esempio di modello statistico, in quanto la correlazione fra il coefficiente di trasmissione atmosferica e l'indice di copertura nuvolosa ricavato dalle mappe satellitari è stabilita in base a una regressione statistica con le misure di radiazione effettuate al suolo.

Negli ultimi anni invece è stato sviluppato in ENEA un modello fisico, *Solarmet* [6], che al pari di *Heliosat* utilizza come dato di partenza le mappe satellitari di copertura nuvolosa ma nel quale, a differenza di *Heliosat*, la trasmissività atmosferica, il coefficiente di riflessione e altri parametri essenziali sono determinati mediante un modello di trasferimento radiativo dell'atmosfera (il modello SBDART) sviluppato presso l'Università della California [7]. *Solarmet* fonda le proprie radici su di un modello elaborato da Marullo ed al. [8] che riconsidera un precedente modello proposto da Gautier ed al. [9].

In *Solarmet* gli effetti degli aerosol atmosferici e delle nubi, sono considerati in maniera semplice ma efficace, assumendo la presenza, in seno all'atmosfera, di uno strato fittizio completamente riflettente. Le differenti condizioni atmosferiche rientrano, invece, in due categorie: situazione di cielo sereno e moderata presenza di aerosol (figura 5) oppure situazione di cielo nuvoloso e/o presenza sensibile di aerosol (figura 6).



Figura 5 – Modello Solarmet: schematizzazione dell'atmosfera con cielo sereno e moderata presenza di aerosol. Per il significato delle grandezze, vedere la didascalia della figura seguente.





Figura 6 – Modello Solarmet: schematizzazione dell'atmosfera reale. Le grandezze che compaiono nella figura e in quella precedente sono le seguenti:

- \dot{I}_a irradianza solare extra-atmosferica su superficie orizzontale (W/m²);
- α coefficiente di riflessione atmosferica per la radiazione diretta;
- \dot{I}_r potenza della radiazione per unità di superficie, riflessa dallo strato fittizio (W/m²);
- $K_T(\vartheta)$ coefficiente di trasmissione atmosferica globale;
- α_1 coefficiente di riflessione atmosferica per la diffusione verso il suolo della radiazione riflessa dal suolo stesso;
- ho albedo del suolo;
- a_d coefficiente di assorbimento atmosferico per la radiazione verso il basso;
- $K_T(\varphi)$ coefficiente di trasmissione atmosferica nella direzione del satellite;
- ρ_{f} albedo dello strato fittizio (condizione di cielo nuvoloso).

Le due figure rappresentano schematicamente i processi di assorbimento, riflessione e trasmissione che si verificano all'interno dell'atmosfera nelle due situazioni distinte. Nel caso di cielo nuvoloso è rappresentato anche lo strato fittizio. La prima o la seconda rappresentazione dell'atmosfera è basata sul valore dell'albedo di questo strato: se tale valore è inferiore a 0.07, l'atmosfera è descritta dal modello con cielo sereno, se, invece, il valore dell'albedo è maggiore o eguale a 0.07, l'atmosfera è descritta dal modello relativo a



cielo nuvoloso. Il valore 0.07 è quello che permette la migliore aderenza tra i dati misurati e i dati calcolati dal modello.

I risultati ottenuti con il modello *Solarmet* sono stati confrontati con i valori misurati presso tre località italiane della rete attinometrica SOLTERM (Casaccia, Montalto di Castro e Specchia, vedi oltre). Il confronto è avvenuto con i dati dell'anno 2002. La differenza percentuale tra misure e dati calcolati mediante il modello, sia per la radiazione diretta che per la globale è minore del 6% su base mensile. Su base annua l'MBE% varia dal 2% al 3% sia considerando la radiazione globale che la diretta. Per quanto riguarda la radiazione globale, è stato effettuato un ulteriore confronto tra i dati ottenuti col metodo *Solarmet* e quelli misurati, relativamente a 29 stazioni dell'Aeronautica Militare Italiana e 22 stazioni della Rete Agrometeorologica Nazionale. La differenza percentuale annuale media tra i dati stimati da satellite mediante *Solarmet* e le misure è 7.6%. Questo valore è ottenuto calcolando la differenza relativa media mensile per ciascuna stazione definita come la media mensile delle quantità:

 $100 x \left| H_{st} - H_{mis} \right| / H_{mis}$

dove H_{st} rappresenta il set delle stime di radiazione globale giornaliera sul piano orizzontale calcolate con *Solarmet* e H_{mis} il corrispondente set delle osservazioni giornaliere misurate presso ciascuna stazione. Il valore annuale è ottenuto come media sulle differenze mensili. Nella Figura 7 sono mostrate le differenze percentuali di tutte le stazioni per l'anno di confronto 1996.



Figura 7 – Modello Solarmet: differenze percentuali assolute tra i valori ottenuti con il modello e i valori misurati. Sono indicate le medie annuali (1996) delle differenze percentuali assolute relative a 51 stazioni dell'Aeronautica Militare Italiana e della Rete Agrometeorologica Nazionale. La retta orizzontale indica la media fra tutte le stazioni.



Anche le mappe ottenute con *Solarmet* per tutto il territorio nazionale, utilizzando le stesse immagini satellitari, hanno una risoluzione spaziale di circa 2.5 km, possono essere calcolate per rappresentare:

- la radiazione media oraria globale su superficie orizzontale e diretta normale;
- la radiazione media mensile giornaliera globale su superficie orizzontale e diretta normale.

Nella figura 8 sono mostrate come esempio due mappe di radiazione solare oraria ottenute con *Solarmet*. Nella figura 9 sono mostrate due mappe di radiazione giornaliera media mensile. Tali mappe sono generate mediante *Solarmet* a partire dalle immagini primarie del Meteosat, fornite da Eumetsat per gli anni compresi tra il 1996 a il 2002.





Figura 8 – Mappe di irradianza solare media oraria ottenute con il modello Solarmet. Sulla sinistra irradianza globale sul piano orizzontale, sulla destra irradianza diretta normale. Anno 1996; lo slot 25 corrisponde alle 12:30 ora di Greenwich. Unità di misura: W/m².

ENER Brogette Selere Termo dinemico	SOL/RS/2007/21	Pag 20 di 45
riogetto Solare Termodinamico	Distr. LIBERA	1 ug. 20 ul 10



Figura 9 – Mappe di radiazione giornaliera media mensile diretta normale ed isolinee. I valori sono ottenuti con il modello *Solarmet*. Mesi di giugno e dicembre 1996. Unità di misura: MJ/m².

Il metodo *Solarmet* è stato testato con le immagini 'primarie' di copertura nuvolosa che EUMETSAT invia direttamente all'ENEA (vedi oltre), nelle quali il 'ritaglio' che rappresenta l'Italia è composto da 421 righe per 541 colonne. Esso sarà adottato nell'aggiornamento e ampliamento dell'archivio ENEA delle mappe di radiazione, sia globale che diretta, con intervalli a partire da quello orario; inoltre, dall'anno 2006 in poi il calcolo sarà possibile con le mappe primarie di nuova generazione (vedi oltre).

3.3. Il nuovo archivio ENEA delle mappe della radiazione solare

Le immagini satellitari di copertura nuvolosa costituiscono il dato di partenza di tutto il sistema di stima della radiazione solare; la loro archiviazione rende possibile la ripetizione del calcolo *off-line* in qualunque momento, ma soprattutto permette di testare nuovi modelli via via messi a punto e di aggiornare le mappe di radiazione fino agli ultimi anni. Attualmente in archivio sono conservate le vecchie mappe di copertura nuvolosa che, come già detto, furono ricevute con frequenza oraria a partire da aprile 1993 fino a maggio 2001. Esse presentano una risoluzione spaziale di circa 2.5x2.5 km². In realtà l'intero data-base delle immagini di copertura nuvolosa è stato ricostruito grazie a un accordo ENEA-EUMETSAT, in virtù del quale l'ente europeo ha fornito all'ENEA tutte quelle relative agli anni passati, a partire dal 1996, e fornisce tuttora quelle che rileva giornalmente. Si tratta di immagini '*primarie*', qualitativamente migliori e con una risoluzione temporale più spinta: infatti fino al 2005 si dispone di una ogni mezzora mentre a partire dal 2006 addirittura una ogni 15 minuti; nel frattempo anche la risoluzione spaziale è au-



mentata e con le immagini attuali si arriva a rappresentare con un pixel un'area pari a poco più di 1 km².

Per quanto riguarda invece la radiazione solare, l'intero archivio delle mappe verrà ampliato e aggiornato rispetto a quello 'storico' (fermo oramai al 1999); al suo completamento, conterrà le mappe di radiazione al suolo:

- a) globale, su piano orizzontale;
- b) diffusa, su piano orizzontale;
- c) diretta sul piano normale ai raggi (Direct Normal Irradiation, DNI) relativa agli intervalli:
- a) orari;
- b) giornalieri;
- c) mensili (o, equivalentemente, giornalieri medi mensili);
- d) annui inoltre:
- a) con riferimento alle singole ore, giorni, mesi e anni; oppure:
- b) come medie pluriennali, che arrivino fino agli anni più recenti (2007).

Tutte le mappe saranno georeferenziate e proposte in più proiezioni geografiche per rispondere a scopi specifici:

- a) nella proiezione originaria, da utilizzare per tutti i calcoli, al fine di evitare che i valori siano alterati nelle operazioni di ri-proiezione. La proiezione originaria discende dalla particolare angolatura visuale con cui l'"occhio" del satellite vede la porzione di territorio rappresentato. Va ricordato che si tratta di un satellite geostazionario che osserva il pianeta da una posizione fissa, ad un'altezza di poco inferiore a 35800 km dalla superficie terrestre, sulla verticale del punto d'incontro fra l'equatore e il meridiano di Greenwich;
- b) in una vera proiezione geografica, ad esempio quella di De l'Isle, a cui si ricorre in cartografia per rappresentare regioni della Terra che come l'Italia sono poste alle medie latitudini. Infatti nella rappresentazione satellitare l'Italia appare innaturalmente "coricata" (si vedano le figure che corredano l'articolo) mentre ci sono casi in cui l'informazione e la familiarità visive della proiezione sono più importanti rispetto al dato numerico vero e proprio;
- c) in una proiezione cilindrica, in cui tutti i pixel di una riga hanno la medesima latitudine, mentre quelli di una stessa colonna la medesima longitudine: in essa i meridiani sono rappresentati con rette parallele, verticali ed equidistanti, mentre ai veri paralleli geografici corrispondono invece le rette orizzontali. Questa proiezione è particolarmente adatta all'estrazione manuale dei valori dalle mappe mediante i tool di elaborazione e analisi o più semplicemente di visualizzazione dei dati.

Infine, con riguardo al formato di memorizzazione, saranno adottati:

a) un formato binario per l'effettuazione dei calcoli, in quanto il più adatto e per la velocità di esecuzione e per il minor spazio utilizzato per la memorizzazione;



- b) un formato grafico fra i più diffusi in ambito informatico, per la restituzione a schermo o su altro dispositivo di output (stampa ecc.);
- c) un formato che si presti ad essere importato agevolmente nel programmi di elaborazione e analisi dei dati 2D (matrici e tabelle);

Infine, l'archivio si avvarrà di strumenti per la 'navigazione' e la ricerca delle mappe memorizzate e disponibili, per la visualizzazione delle stesse e, infine, per l'estrazione dei dati.



4. La rete attinometrica ENEA-SOLTERM

Dal 2000 l'ENEA ha intrapreso un'approfondita attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie solari a concentrazione per la captazione e l'accumulo di calore ad alta temperatura finalizzate alla produzione di energia elettrica mediante cicli termodinamici e alla produzione di idrogeno attraverso la decomposizione della molecola d'acqua. Le attività, svolte presso l'unità SOLTERM del dipartimento TER, si stanno concretizzando nel progetto Archimede che verrà realizzato, in collaborazione con ENEL, in Sicilia presso la centrale termoelettrica di Priolo Gargallo (SR).

Contrariamente a quanto succede per le misure di irraggiamento globale sul piano orizzontale, molto scarsa è la disponibilità, sia in termini di numero di località che di periodi di acquisizione, di dati con intervalli almeno orari di radiazione diretta. Come già detto in precedenza, tale componente è l'unica che ha le caratteristiche di collimazione che ne consentono l'uso mediante sistemi a concentrazione.

Lo studio dettagliato di impianti solari a concentrazione non può prescindere dalla conoscenza di questo parametro. Oltre ad essere fondamentali per il calcolo dell'energia che un dato impianto può produrre, gli andamenti orari permettono di identificare eventuali criticità sul sistema di controllo e regolazione e sullo stress termomeccanico al quale sono sottoposti i componenti impiegati. Infine la conoscenza dei profili di irraggiamento diretto orario permette il corretto dimensionamento del sistema di accumulo in base a considerazioni tecnico-economiche.

Per colmare questa lacuna informativa, a partire dal 2001 l'ENEA ha installato sul territorio italiano alcune stazioni per la misura della radiazione diretta. Attualmente le stazioni funzionanti che costituiscono la Rete attinometrica SOLTERM dell'ENEA sono cinque; nella figura 10 è indicata la loro localizzazione sul territorio nazionale, mentre nella tabella 1 – per ognuna di esse – sono riportati i dati geografici di riferimento, la data di attivazione e le misure che vengono effettuate.

In generale le centraline sono state collocate nei siti dove era stata ipotizzata la realizzazione di impianti solari termodinamici (Specchia, Montalto di Castro e Priolo Gargallo) o all'interno di centri ENEA (Casaccia e Trisaia).

I dati acquisiti dalla rete alimentano un data-base, per mezzo del quale è possibile effettuare sintesi e statistiche (dati orari, giornalieri, giornalieri medi mensili ecc.); inoltre, gli stessi dati vengono utilizzati per calibrare i parametri che intervengono nei modelli di stima della radiazione a partire dai dati satellitari.

ENER Bragatta Calara Tarma dinamisa	SOL/RS/2007/21	Pag. 24 di 45
	Distr. LIBERA	1 ug. 1 1 un 10



Figura 10 – Rete attinometrica ENEA-SOLTERM: mappa delle località in cui sono installate le centraline di acquisizione dei dati. Tutte le centraline misurano la radiazione globale e diffusa sul piano orizzontale e quella diretta su piano normale, alcune anche la temperatura; la registrazione delle misure avviene ogni 5 minuti; la prima centralina è stata installata a novembre 2001.

		Coordinate				
Denominazione	rov	Latitudine (Nord)	longitudine (Est Greenwich)	Inizio funziona- mento	Grandezze acquisite	
Casaccia	М	42°03'	12ግ8'	novembre-01	radiazione, temperatura, vento	
Trisaia	т	40ግ0'	1639'	febbraio-02	radiazione	
Montalto di Castro	т	42°22'	1131'	febbraio-02	radiazione, temperatura, vento, umidità	
Specchia	E	3957'	18ግ6'	maggio-02	radiazione, temperatura, vento	
Priolo Gargallo	R	3708'	15°13'	luglio-03	radiazione	

Tabella 1 – **Stazioni della Rete attinometrica ENEA-SOLTERM.** Nella colonna delle grandezze acquisite, per 'radiazione' si intendono le tre grandezze: globale e diffusa su piano orizzontale e diretta su piano normale. Per ognuna delle grandezze acquisite viene memorizzato il valore medio e lo scarto quadratico delle letture effettuate nei 5 minuti precedenti la registrazione.





Figura 11 – Rete attinometrica ENEA-SOLTERM: stazione di acquisizione della Casaccia (Roma). La centralina è posta su di un edificio all'interno del Centro Ricerche dell'ENEA, del quale sullo sfondo si intravedono alcune strutture.



Figura 12 – Rete attinometrica ENEA-SOLTERM: stazione di acquisizione di Specchia (Lecce)



4.1. Descrizione della stazione di acquisizione e trasmissione dati

Tutte le stazioni installate consentono la misura delle tre grandezze fondamentali ai fini della caratterizzazione attinometrica: la radiazione globale sul piano orizzontale I, la radiazione *diffusa* sul piano orizzontale I_d e la radiazione *diretta* sul piano normale ai raggi del sole I_{bn} . I tre dati misurati sono tra loro correlati tramite la relazione:

 $I_{bn} \cdot \cos \vartheta_z = I - I_d$

dove ϑ_z è l'angolo che i raggi solari formano con la normale al piano orizzontale (angolo zenitale), che può essere calcolato a partire dalla latitudine e longitudine del luogo e dal giorno e dall'ora 'attuale'. In tal modo, anche in caso di errore su una delle tre grandezze, questa può essere calcolata utilizzando le misure corrette delle altre due.

L'inseguitore solare (solar tracker), mostrato in figura 13, è sicuramente l'elemento più critico per la misura della radiazione solare diretta. Infatti esso è un organo in movimento che assolve al duplice compito di schermare, mediante una sfera metallica nera opportunamente orientata, il sensore di radiazione diffusa sul piano orizzontale e di comandare il puntamento del pireliometro, strumento per la misura della radiazione diretta, verso il disco solare. Pertanto, all'inseguitore è richiesta una notevole precisione e un'estrema affidabilità, per limitare al minimo i periodi di non allineamento, nei quali tutte le grandezze misurate sarebbero falsate.

ENEN Progetto Solaro Termodinamico	SOL/RS/2007/21	Pag 27 di 45
Tiogetto Solare Termountainico	Distr. LIBERA	1 ug. _ / ul 10



Figura 13 – Rete attinometrica ENEA-SOLTERM, particolare di una stazione: l'inseguitore solare. L'inseguitore solare (solar tracker) è orientato costantemente nella direzione di provenienza dei raggi solari, sia per permettere la misurazione della radiazione diretta, sia per schermarla in modo che sia possibile misurare anche quella diffusa.

Il sistema si orienta automaticamente sul disco solare durante il suo percorso, giornaliero e stagionale, sulla volta celeste. Poiché il puntamento deve essere garantito sia in presenza che in assenza di nuvole l'inseguitore solare è programmato per orientarsi verso la posizione del Sole calcolata a partire dall'ora, dal giorno e dalla posizione geografica del sito (latitudine e longitudine). Nelle stazioni utilizzate, al fine di garantire un più affidabile puntamento il solar tracker è dotato di un sistema di orientamento a catena chiusa, basato su fotocellule, che interviene qualora la radiazione diretta sia superiore ad una certa soglia (cielo sereno). In tal modo piccoli errori di impostazione o di orientazione dell'inseguitore sono compensati dal sistema di controreazione automatico.

Sull'inseguitore solare è installato un pireliometro costituito da una termopila le cui giunzioni calde sono esposte alla radiazione diretta mentre le giunzioni fredde sono schermate alla radiazione stessa. La tensione prodotta dalla termopila è dunque proporzionale alla radiazione diretta incidente. Al fine di considerare solo la radiazione diretta proveniente dal disco solare, l'elemento sensibile è situato ad una estremità di un cilindro metallico, con rivestimento interno assorbente. In corrispondenza dell'altra estremità, quella rivolta al Sole, è situata una finestra di quarzo che isola il sistema dall'esterno.

Per la misura della radiazione diffusa si utilizza un piranometro il cui principio di funzionamento è del tutto identico a quello del pireliometro descritto in precedenza. In questo caso però dovendo raccogliere la radiazione proveniente da un emisfero, la parte esposta della termopila è isolata da due semisfere di quarzo. Poiché dobbiamo misurare la



componente diffusa della radiazione è indispensabile che il sensore sia schermato dai raggi provenienti direttamente dal disco solare. Ciò è ottenuto interponendo una piccola sfera tra le parti attive del piranometro e il Sole. Un serie di leverismi ed una sfera metallica di 5 cm di diametro, meccanicamente collegati all'inseguitore, svolgono tale funzione.

Infine la radiazione globale sul piano orizzontale è misurata attraverso un altro piranometro, del tutto identico ai precedenti, parallelo al piano orizzontale senza ostruzioni di sorta in grado dunque di intercettare tutta la radiazione indipendentemente dalla sua direzione.

La stazione è dotata di un sistema automatico di acquisizione dati che memorizza il valor medio e gli scarti quadratici medi di ogni grandezza a partire dai dati misurati nei 5 minuti precedenti. Tutti i dati sono registrati su di un modulo di memoria interno in grado di contenere i dati acquisiti per un intervallo di alcuni mesi. A intervalli regolari (per lo più settimanali) i dati vengono trasferiti e, dopo il controllo della loro congruità, memorizzati in via definitiva nel data-base per le successive elaborazioni. Il trasferimento avviene utilizzando sistemi di trasmissione dati via GSM.



4.2. Elaborazioni effettuate

I dati archiviati vengono elaborati e raggruppati per ottenere una serie di informazioni che ne rendano più agevole l'utilizzo. Di seguito verranno illustrate a mo' di esempio solo alcune delle elaborazioni che trovano ampio impiego nello studio dei siti per la localizzazione di impianti solari a concentrazione, ovvero la costruzione: della giornata limite, dello "spettro" delle intensità e, infine, delle durate medie di periodi con valore sopra soglia.

<u>Costruzione della giornata limite</u>. Il calcolo serve per identificare il profilo di radiazione massimo ottenibile per il giorno migliore. Tale dato è utile per il dimensionamento sia del sistema di accumulo che dell'impianto termodinamico di conversione dell'energia termica.

In pratica per il periodo preso in considerazione, in genere per ogni mese dell'anno, viene costruito il profilo giornaliero limite massimo. Per ogni ora viene infatti selezionato il valore massimo di radiazione rilevato nel mese in questione (vedere i grafici).



Figura 14 – Giorno-limite dell'irraggiamento globale sul piano orizzontale I. Dati della rete attinometrica ENEA-SOLTERM, stazione di Priolo Gargallo (Siracusa). Le curve sono relative alla medie pluriennali 2004-2006; sono rappresentati gli andamenti di tre soli mesi: quelli di tutti gli altri si situano fra dicembre (il più basso) e luglio (il più alto).





Figura 15 – Giorno-limite dell'irraggiamento diretto normale (I_{h}). Dati della rete attinometrica ENEA-SOLTERM, stazione di Priolo Gargallo (Siracusa). Le curve sono relative alla medie pluriennali 2004-2006; sono rappresentati gli andamenti di tre soli mesi: quelli di tutti gli altri si situano fra gennaio e giugno. Gli andamenti dei mesi invernali sono più 'stretti' perché le giornate sono più corte, ma presentano valori più elevati nelle ore centrali della giornata perché la distanza Sole-Terra diventa minima in gennaio, quando la Terra passa per il perielio, ma soprattutto a causa del minor contenuto di vapor d'acqua nell'atmosfera dovuto ai valori più bassi della temperatura ambiente (giornate con cielo "più limpido"). Tutti gli andamenti hanno una forma di campana molto 'schiacciata' in quanto per definizione la superficie ricevente è sempre ortogonale ai raggi e dovrebbe ricevere la stessa intensità di radiazione per tutto l'arco delle ore diurne; nella realtà nelle ore periferiche della giornata (poco dopo dell'alba e prima del tramonto) si hanno valori più bassi in quanto in tali ore i raggi del Sole sono più inclinati rispetto all'orizzonte e di conseguenza compiono un percorso più lungo nell'attraversare l'atmosfera terrestre, venendo assorbiti in misura maggiore. Il dato di irraggiamento "limite" è in generale funzione della torbidità dell'aria, della latitudine e di altri fattori climatici locali ma non dipende né dalle perturbazioni né dalla nuvolosità occasionale. I dati archiviati consentono ovviamente di costruire grafici analoghi riferiti ai valori medi anziché "limite"; la differenza tra il valore medio e quello limite sarà indice della nuvolosità del mese in esame. Infine, è possibile ripetere le stesse analisi per l'irraggiamento globale; com'era facilmente prevedibile l'effetto della nuvolosità è più marcato per la radiazione diretta rispetto alla globale poiché nel secondo caso parte della radiazione intercettata dalle nubi viene convertita in radiazione diffusa che in ogni caso è conteggiata nell'ammontare globale.

<u>Costruzione dello spettro di intensità</u>. In questo caso il *range* dei valori possibili per la grandezza in questione viene suddivisa in un certo numero di intervalli. Per ognuno di

ENER Progetto Solaro Tormo dinamico	SOL/RS/2007/21	Pag 31 di 45
	Distr. LIBERA	

tali intervalli viene calcolato la percentuale di osservazioni nel periodo preso in considerazione (generalmente il mese o addirittura l'anno). Tale dato è molto utile per capire su quali valori puntuali di intensità si concentra la radiazione (vedi grafico).



Figura 16 – Spettro di intensità dell'irraggiamento diretto normale (I_b). Dati della rete attinometrica ENEA-SOLTERM, stazione di Priolo Gargallo (Siracusa). Sono rappresentati gli andamenti per i mesi di gennaio e luglio 2004. In ascissa l'insieme delle misure di I_b di un giorno è stato suddiviso in intervalli di ampiezza pari a 50 W/m², mentre in ordinata sono indicate le ore giornaliere durante le quali I_b si è mantenuto all'interno di ciascun intervallo. Per non 'appiattire' il grafico, la scala delle ordinate è stata 'tagliata' a 2 ore, anche se nel primo intervallo cade un numero maggiore di ore (comprensibilmente, in quanto sono conteggiate pure le ore notturne, durante le quali l'irraggiamento solare è ovviamente nullo). Si può notare che il massimo di ore dei mesi estivi è più grande rispetto ai mesi invernali e si verifica per valori più elevati dell'irraggiamento.

ENEN Bragatta Salara Tarma dinamian	SOL/RS/2007/21	Pag 32 di 45
	Distr. LIBERA	1 ug. 0 2 ul 10

<u>Costruzione delle durate medie di periodi con valore sopra soglia</u>. Questa elaborazione è correlata alla precedente e rappresenta il valore atteso delle ore per cui il valore di radiazione è al di sopra di una soglia prefissata. Il funzionamento di un impianto solare termodinamico può essere scomposto in varie fasi operative in funzione della radiazione disponibile. Conoscere dunque dettagliatamente le percentuali di ore con radiazione al di sopra di un certo valore è indispensabile per una corretta predizione delle prestazioni complessive.



Figura 17 – Durate medie di periodi con valore sopra soglia, dell'irraggiamento diretto normale. Dati della rete attinometrica ENEA-SOLTERM, stazione di Priolo Gargallo (Siracusa). Per ciascun dato rappresentato in figura, l'ordinata corrisponde alla durata (in termini di ore giornaliere) in cui l'irraggiamento diretto normale (\dot{I}_b) si è mantenuto al di sopra del valore riportato in ascissa.



5. La previsione della radiazione solare diretta

Nell'ambito del Progetto Solare Termodinamico dell'ENEA, è stato messo a punto un sistema che consente di effettuare previsioni di radiazione solare diretta. Tale studio nasce dalla necessità della conoscenza in anticipo dell'energia solare che sarà disponibile nel breve periodo (alcuni giorni) al fine di garantire una corretta gestione degli impianti solari a concentrazione per la produzione di energia elettrica.

L'energia solare è caratterizzata da un'aleatorietà intrinseca e, oltre ad avere interruzioni dovute all'alternanza giorno-notte e a risentire del ciclo stagionale che ne fa variare la disponibilità giornaliera nel corso dell'anno, risente delle condizioni meteorologiche contingenti. Possono verificarsi situazioni nelle quali l'impianto solare è interessato dal passaggio occasionale di nubi che coprono tutto o in parte il sito in giornate altrimenti soleggiate, oppure possono verificarsi situazioni con giorni di mal tempo prolungato durante i quali l'impianto non riceve per lungo tempo energia solare.

Per ovviare a queste situazioni, la tecnologia ENEA prevede l'adozione di un sistema di accumulo termico di grandi dimensioni atto a compensare queste variazioni e assicurare la regolarità di funzionamento all'intero impianto. Per il controllo dei flussi energetici, la programmazione della produzione di energia elettrica e la gestione dell'energia immagazzinata nell'accumulo è di fondamentale importanza la stima della produttività dell'impianto nei giorni successivi e quindi della radiazione solare prevista.

Il sistema di previsioni realizzato – concepito per essere asservito al più generale sistema di controllo dell'impianto solare - consente di prevedere la radiazione solare diretta per la giornata attuale e per i due giorni successivi. Per effettuare le previsioni il sistema si avvale di siti Internet selezionati appositamente, specializzati nella fornitura di previsioni meteorologiche. Questi devono infatti essere affidabili sia sotto il profilo della regolarità di funzionamento che sotto quello dell'attendibilità delle previsioni meteorologiche che forniscono. Attualmente il sistema è stato messo a punto e sono quotidianamente effettuate le previsioni di radiazione diretta relativamente a due località particolarmente interessanti: Casaccia (Roma) e Priolo Gargallo (Siracusa). La prima è sede dell'impianto PCS (Prova Collettori Solari) dell'ENEA dove sono studiati i differenti componenti della centrale solare e la seconda è il luogo prescelto per la realizzazione della prima centrale solare industriale che sarà realizzata in collaborazione tra l'ENEA e l'ENEL (progetto Archimede).

Lo sviluppo delle previsioni per queste due località ha richiesto la selezione anche di un certo numero di località attorno ad esse, a distanza compresa nel raggio di 30 km, che presentano caratteristiche meteorologiche omogenee, ciò al fine di aumentare la statistica di dati disponibili. Analogo studio dovrebbe essere fatto nel caso fosse necessario estendere le previsioni ad altre località.

Le previsioni reperite in Internet, per le due località e per le località attorno, sono state ripartite in tre classi, in linea con la suddivisione che viene generalmente impiegata studiando la radiazione solare diretta associata alla copertura nuvolosa, che sono:



- a) *Cielo sereno (C=1),* quando la radiazione diretta misurata al suolo è maggiore del 70% dell'extra-atmosferica;
- b) Nuvolosità media (C=2), quando la radiazione diretta misurata al suolo è compresa tra il 30% e il 70%;
- c) Nuvolosità intensa (C=3), quando la radiazione diretta misurata al suolo è inferiore al 30%.

C indica la copertura nuvolosa. Per ottenere le previsioni di radiazione solare diretta, sono stati successivamente incrociati i dati di previsione di copertura nuvolosa con quelli di radiazione solare diretta misurati presso le stazioni Casaccia e Priolo Gargallo della rete attinometrica ENEA-SOLTERM. L'output dell'algoritmo è mostrato in Figura 18.

Giovedì	Venerdì	Sabato	
1.49	1.24	1.29	media
1.00	1.00	1.00	moda
0.47	0.42	0.49	d.s.
473	577	562	DNI (W/m²)
Siti non aggiornati 0			

Figura 18 - Modalità di presentazione dei risultati del sistema di previsioni della radiazione diretta. Tale modalità è prevista per la consolle dell'impianto solare e sarà utilizzata nelle pagine web del sito SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare, dove una versione del sistema delle previsioni sarà ospitato in un'apposita sezione. Nella tabella - attualmente disponibile per i due siti per i quali il sistema è stato finora approntato: Casaccia e Priolo Gargallo - sono indicati i giorni per i quali è valida la previsione; con "media" è indicato il valor medio della copertura nuvolosa sul sito - compresa tra 1 (cielo sereno) e 3 (cielo coperto) - dedotto dalla media sulle località selezionate attorno al sito e rappresentativi di questo; con "moda" è indicato il valore previsto più ricorrente tra i valori relativi alle diverse località sulle quali i differenti siti Internet effettuano la previsione; con "d.s." è indicata la deviazione standard tra i valori di previsione: questo ultimo valore oltre a rappresentare la conformità tra le previsioni effettuate dai differenti siti Internet, fornisce anche un'indicazione sulla variabilità temporale della radiazione solare. Infine con DNI (Direct Normal Irradiation) è indicato il valore medio - relativo all'arco diurno - dell'irraggiamento diretto normale nella giornata considerata. L'indicazione "siti non aggiornati" consente di valutare immediatamente quanti dei siti Internet usati per realizzare le previsioni non hanno aggiornato la propria previsione. Le previsioni fornite attualmente vengono aggiornate quotidianamente alle 09:30.



La tabella 2 mostra	i risultati	raggiunti	con il sistema	di	previsioni studiato.
La tabella 2 mostra	1 115unuti	raggiunni	con n sistema	u	pievisioni studiuto.

Radiazioni	Р	ER OGG	I	PEI	R DOMA	NI	PER D	OPODO	MANI
previste	Radia	zioni mis	surate	Radia	zioni mis	surate	R	adiazior	ıi
	basse	medie	alte	basse	medie	alte	basse	medie	alte
Medie	25	7	1	27	4	2	21	4	0
Basse	12	39	17	17	40	24	22	38	36
Alte	1	14	103	0	15	90	1	15	82

Tabella 2 - Risultati conseguiti dal sistema di previsioni della radiazione diretta. La verifica è stata fatta su un totale di 219 casi relativi a situazioni nelle quali si disponeva contemporaneamente di misure e di previsioni per oggi, domani e dopodomani.

Come si può dedurre dalla tabella mostrata, le percentuali ottenute di previsioni "OK", cioè con previsioni e misure che ricadono nella stessa classe, di previsioni "semi OK", per le quali le misure e le previsioni ricadono in classi contigue ed infine di previsioni "not OK", per le quali le misure e le previsioni ricadono in classi non contigue, sono le seguenti:

	OK	semi OK	not OK
per oggi	76%	23%	1%
per domani	72%	27%	1%
per dopodomani	64%	35%	1%

Quindi, in conclusione, nel 99% dei casi le previsioni riescono per lo meno ad avvicinarsi alla radiazione reale misurata.

La conoscenza anticipata della radiazione solare disponibile sul sito di un impianto solare consente di gestire convenientemente l'impianto stesso. Infatti, l'energia fornita alla rete elettrica presenta delle remunerazioni che dipendono dal momento nel quale essa viene erogata seguendo appositi piani di tariffazione. Conoscendo anticipatamente quanta energia si potrà raccogliere dal Sole, il gestore dell'impianto può decidere tempi e modi di erogazione in maniera da ottimizzarne il rendimento. Ma oltre a questo beneficio, altri sono i vantaggi dell'impiego delle previsioni di radiazione solare. Si possono determinare anticipatamente i giorni di fermo dell'impianto per la sua manutenzione ordinaria o straordinaria, facendoli coincidere con periodi di condizioni meteorologiche avverse. In caso di previsione di condizioni pericolose per l'impianto, ad esempio per temporale con grandine o vento forte, le superfici captanti potranno essere disposte preventivamente in posizione di sicurezza.

La previsione quantitativa della radiazione solare fornisce un metodo obiettivo per valutare la validità delle previsioni su tutto l'arco della giornata. Inoltre il verificarsi nel tempo di una diminuzione nella correlazione tra la radiazione prevista e quella osservata



Ulteriori sviluppi del metodo di previsioni sono previsti secondo due direzioni: allungamento del periodo di previsione fino a raggiungere 10 giorni e aumentato della risoluzione temporale, scendendo dall'intervallo di 24 ore a differenziare tra mattina, pomeriggio e sera. L'aumento della risoluzione temporale, potrà anche essere spinto fino all'intervallo dell'ora, infatti alcuni siti meteorologici forniscono già una tale risoluzione temporale. Questa direzione di sviluppo andrebbe così a raccordarsi con previsioni di nowcasting. Infatti potrebbero essere utilizzate le immagini del Meteosat di ultima generazione con risoluzione temporale di 15 minuti, per fornire anche previsioni in tempo reale e risolvere così l'esigenza di tenere sotto controllo formazioni nuvolose isolate capaci di creare shock termici improvvisi e localizzati su tutto l'impianto o su parti di esso.



6. Il sito SolarItaly – Atlante italiano della radiazione solare

Nel mese di settembre 2006 è stato attivato il sito Internet SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare [2], all'interno del dominio ENEA. Il sito, ancora in fase di completamento, offre la possibilità di utilizzare gratuitamente da parte degli utenti della rete, la grande quantità di dati, di procedure e di informazioni sviluppati in questi anni in ENEA relativi alla radiazione solare.

Al momento è operativa la sezione di calcolo della radiazione su superficie comunque orientata che viene incontro alle esigenze di tutti quegli operatori che hanno necessità di valutare l'energia solare incidente su piani inclinati. Nelle applicazioni energetiche occorre infatti calcolare la quantità di radiazione 'disponibile' sulla superficie captante dell'impianto, ma questa non è necessariamente disposta orizzontalmente: anzi, la sua orientazione è di volta in volta stabilita o per ottimizzare l'efficienza di captazione, come ad esempio per i pannelli fotovoltaici, disposti con un angolo d'inclinazione compreso fra 30° e 45° gradi e orientati preferibilmente in direzione Sud o Sud-Est, o imposta da vincoli costruttivi, come accade per le pareti (vetrate) verticali degli edifici. Infine nei sistemi ad inseguimento la direzione della superficie ricevente varia continuamente per 'inseguire' nella maniera più efficace la posizione del Sole nel suo cammino diurno (tale movimento può essere realizzato mediante una rotazione intorno ad uno o due assi; nel secondo caso l'inseguimento si realizza in maniera perfetta in quanto si riesce a mantenere la superficie costantemente perpendicolare alla direzione dei raggi solari).

Lo strumento di calcolo (informatico) è costituito essenzialmente dai seguenti componenti: l'archivio ENEA delle mappe di radiazione globale giornaliera media mensile su piano orizzontale, un sistema di interrogazione per estrarre i dati una volta che siano assegnati il mese e le coordinate geografiche della località e, infine, l'algoritmo che implementa il calcolo per riportare il dato sulla superficie di inclinazione e orientazione assegnati. Poiché le mappe abbracciano l'intera regione italiana è possibile effettuare il calcolo per qualunque località del nostro Paese. Il nuovo strumento è stato sviluppato nel quadro delle attività del Progetto Solare Termodinamico dell'ENEA.

L'algoritmo incorporato nello strumento di calcolo, che riprende il procedimento proposto dalla norma UNI 8477-1 [10], si basa sulla formula seguente:

$$\overline{H}_{incl} = \overline{R}_b \overline{H}_b + \overline{R}_d \overline{H}_d + \overline{R}_r \overline{H}$$

in cui \overline{H}_{incl} è la radiazione globale giornaliera media mensile da calcolare, riferita alla superficie ricevente. L'orientazione di questa sarà definita dal suo angolo d'inclinazione β rispetto al piano orizzontale e dall'angolo azimutale γ rispetto ad un punto cardinale (Sud). \overline{H}_{b} e \overline{H}_{d} sono rispettivamente le radiazioni diretta e diffusa giornaliere medie mensili su piano orizzontale mentre \overline{R}_b e \overline{R}_d sono i coefficienti che le 'riportano' sul piano inclinato della superficie ricevente e dipendono - tra l'altro - dai due angoli appena elencati.



Infine \overline{H} è la radiazione globale giornaliera media mensile, sempre su piano orizzontale, somma della diretta e della diffusa:

 $\overline{H} = \overline{H}_{b} + \overline{H}_{d}$

Come si vede dalla prima delle due formule appena mostrate, \overline{H} contribuisce per intero, attraverso il coefficiente \overline{R}_r , alla componente diffusa che raggiunge la superficie inclinata. \overline{H} è il punto di partenza del calcolo e viene estratto direttamente dalle mappe per i mesi e per la località indicati dall'utente: in ciò il calcolo on-line dell'ENEA differisce dall'altra norma UNI 10349 [11] la quale si limita a riportare solo i valori tabellati per i capoluoghi provinciali mentre, per tutte le altre località, suggerisce di interpolare linearmente i valori disponibili in funzione della latitudine. Per scomporre il dato globale \overline{H} nella sue due parti diretta \overline{H}_{b} e diffusa \overline{H}_{d} , si può usare una delle numerose correlazioni proposte in letteratura, tutte numericamente equivalenti a fini pratici: nel calcolo ENEA è possibile scegliere fra tre, di cui una è stata ottenuta con i dati delle rete attinometrica ENEA-SOLTERM e un'altra coincide con la formula della norma UNI. Le espressioni per i due coefficienti R_d e \overline{R}_r si ricavano agevolmente in funzione dell'angolo d'inclinazione e del coefficiente di riflessione del suolo ipotizzando che il cielo si comporti come una sorgente isotropa rispetto alla radiazione diffusa e il suolo in maniera analoga con quella riflessa. Invece per il coefficiente della radiazione diretta R_b si ricorre all'assunzione universalmente accettata che il rapporto medio mensile tra irraggiamento giornaliero diretto, al suolo, su superficie inclinata, e quello su piano orizzontale, sia uguale all'analogo rapporto al top dell'atmosfera; in questo modo si può dimostrare che tale coefficiente può calcolarsi come rapporto:

$$\overline{R}_{b} = \frac{\int_{sr}^{ss} \cos \vartheta dt}{\int_{sr}^{ss} \cos \vartheta_{z} dt}$$

Nell'uguaglianza precedente $\vartheta \in \vartheta_z$ sono gli angoli che i raggi solari formano con la normale alla superficie ricevente e a quella orizzontale (il secondo dei due è l'angolo zenitale); essi variano istante per istante e l'integrazione è effettuata nell'intervallo temporale che va dall'alba (*sr: sunrise*) al tramonto (*ss: sunset*). I due integrali che figurano nella formula vengono ovviamente risolti con riferimento al 'giorno medio' di ciascun mese.

Un'ultima possibilità offerta dalla procedura on-line riguarda l'eventuale presenza di ostacoli che per alcune ore del giorno possano schermare i raggi solari diretti sulla superficie ricevente (a causa di una orografia particolare del terreno: colline ecc.; o per la presenza di manufatti come edifici vicini ecc.). In questo caso occorre conoscere preventivamente l'intervallo diurno – più breve – in cui i raggi solari diretti 'investono' effettivamente la superficie, perché la procedura ne tenga conto e corregga gli estremi dell'intervallo d'integrazione (solo quelli dell'integrale che figura a numeratore).





Figura 19 - Home page del sito SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare. Attualmente, la sezione 'portante' del sito è costituita dagli strumenti di Calcolo della radiazione solare che giunge al suolo. Il calcolo è riferibile alla molteplicità di configurazioni delle superfici captanti degli impianti energetici che sfruttano la fonte solare, si attiene alla normativa UNI ed utilizza i dati di radiazione raccolti dall'ENEA.



Mark > Calcel > Regram susperfice inclinate Mark > Calcel > Regram susperfice inclinate Mark > Calcel > Regram susperfice inclinate Action on line acid Bern > Calcel > Regram susperfice inclinate Bern > Calcel > Regram susperfice inclinate Action on line acid Bern > Calcel > Regram susperfice inclinate Bern > Calcel > Regram susperfice inclin		Home	<u>Chi siamo</u>	Archivio		Calcoli		Previsioni	<u>Contatto</u>
 blografia e lleganenti util portatio tori gusto Maccai messeo Spinell oro Coglani matistratori server lo Gastanel uro Mione - Latitudine: 41°54'00"; longitudine: 12°29'00" - Azimat: 0" - Modello per il calcolo della frazione della radiazione diffusa rispetto alla globale: ENEA-SOLTERM - Ocefficiente di inflessione del suolo: 0.6 - Unità di misura: MJ/m2 - Calcolo per tutti i mesi - Calcolo per tutti i mesi - Sactorali di misura: MJ/m2 - Calcolo per tutti i mesi - Bisultato: - Mese Ostacolo Rggmm su sup incl. Errore Gennaio assente 13.64 MJ/m2 - Marzo assente 13.64 MJ/m2 - Marzo assente 14.34 MJ/m2 - Marzo assente 14.34 MJ/m2 - Marzo assente 14.52 MJ/m2 - Giugno assente 14.52 MJ/m2 - Luglio dall'alba al tramonto 11.47 MJ/m2 - Agosto assente 14.96 MJ/m2 - Dicembre assente 12.75 MJ/m2 - Dicembre assente 11.10 MJ/m2 - Settembre assente 11.10 MJ/m2 - Settembre assente 11.10 MJ/m2 - Settembre assente 11.10 MJ/m2 - Dicembre assente 11.00 MJ/m2 - Dicembre assente 11.00 MJ/m2 - Dicembre assente 11.00 MJ/m2 - Dicembre assente 11.00 MJ/m2 - Dicembre assente 10.00 MJ/m2 - Dicembre assente	ome <u>ii siamo</u> isa c'è nel sito rchivio on line ilcoli evisioni ocumentazione	Home > Ca Radiazio Media quino Dati di inp	<u>coli</u> > Rggmm su superfi pne solare global puennale 1995÷1999 put:	icie inclinata	era me	edia me	nsile	su superficie	inclinata
Monitor Mese Ostacolo Rggmm su sup.incl. Errore Genatio assente 13.64 MJ/m2 Genatio assente 14.34 MJ/m2 Ministratore sito uro Mione Marzo assente 15.43 MJ/m2 Marzo assente 15.43 MJ/m2 Aprile dalle 10h 22'00.0" alle 14h 30'00.0" 11.43 MJ/m2 Maggio dall'alba alle 13h 00'00.0" 11.25 MJ/m2 Giugno assente 14.52 MJ/m2 Luglio dall'alba all tramonto 11.47 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Settembre assente 14.96 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 mono convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale	<u>liografia e</u> <u>legamenti utili</u> <u>ntatto</u> tori gusto Maccari ncesco Spinelii ro Cogliani a lizzazione uro Minne	- Latitudine: - Azimut: 0° - Inclinazione - Modello pe - Coefficient - Unità di mi - Calcolo pe Risultato:	41°54'00"; longitudine: e rispetto al piano orizzo er il calcolo della frazione e di riflessione del suolo sura: MJ/m2 r tutti i mesi	12°29'00" ontale: 90° e della radiazi o: 0.6	one diffus	sa rispetto	alla glol	bale: ENEA-SOLTE	RM
ministratori server o Bastaneli uro Giorgetti Gennaio assente 13.64 MJ/m2 ministratore sito uro Mione Marzo assente 14.34 MJ/m2 Marzo assente 15.43 MJ/m2 Aprile dalle 10h 22'00.0" alle 14h 30'00.0" 11.43 MJ/m2 Maggio dall"alba alle 13h 00'00.0" 12.25 MJ/m2 Giugno assente 14.52 MJ/m2 Luglio dall"alba al tramonto 11.47 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 11.10 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale	ncesco Spinelli	Mese	Ostacolo	F	Rggmm s	u sup.incl.	Errore		
o Bastanelli uro Giorgetti Assente 14.34 MJ/m2 ministratore sito uro Mione Marzo assente 15.43 MJ/m2 Aprile dalle 10h 22'00.0" alle 14h 30'00.0" 11.43 MJ/m2 Maggio dall'alba alle 13h 00'00.0" 12.25 MJ/m2 Maggio dall'alba alle 13h 00'00.0" 12.25 MJ/m2 Giugno assente 14.52 MJ/m2 Luglio dall'alba all tramonto 11.47 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Settembre assente 14.88 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 12.75 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale	nministratori server	Gennaio	assente		13.64	MJ/m2			
Marzo assente 15.43 MJ/m2 ministratore sito ro Mione Aprile dalle 10h 22'00.0" alle 14h 30'00.0" 11.43 MJ/m2 Maggio dall'alba alle 13h 00'00.0" 12.25 MJ/m2 Image: Marzo Im	o Bastianelli Iro Giorgetti	Febbraio	assente		14.34	MJ/m2			
Aprile dalle 10h 22'00.0" alle 14h 30'00.0" 11.43 MJ/m2 Maggio dall'alba alle 13h 00'00.0" 12.25 MJ/m2 Giugno assente 14.52 MJ/m2 Luglio dall'alba al tramonto 11.47 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Settembre assente 14.88 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 11.10 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con la virgola come separatore decimale total tile dei risultati on una delle due versioni:	•••••	Marzo	assente		15.43	MJ/m2			
Maggio dall'alba alle 13h 00'00.0" 12.25 MJ/m2 Giugno assente 14.52 MJ/m2 Luglio dall'alba al tramonto 11.47 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Settembre assente 14.88 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 12.75 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con la virgola come separatore decimale total tuto come separatore decimale	ministratore sito ro Milone	Aprile	dalle 10h 22'00.0" alle 1	14h 30'00.0"	11.43	MJ/m2			
Giugno assente 14.52 MJ/m2 Luglio dall'alba al tramonto 11.47 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Agosto assente 14.88 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 12.75 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale Mide title dei risultati decimale		Maggio	dall'alba alle 13h 0	0'00.0"	12.25	MJ/m2			
Luglio dall'alba al tramonto 11.47 MJ/m2 Agosto assente 14.96 MJ/m2 Settembre assente 14.88 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 12.75 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale MJ/m2		Giugno	assente		14.52	MJ/m2			
Agosto assente 14.96 MJ/m2 Settembre assente 14.88 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 12.75 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale MJ/m2 (anno convenzionale di 20.00000000000000000000000000000000000		Luglio	dall'alba al tram	ionto	11.47	MJ/m2			
Settembre assente 14.88 MJ/m2 Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 12.75 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale Nome to totale di		Agosto	assente		14.96	MJ/m2			
Ottobre presente tutto il giorno 5.91 MJ/m2 Novembre assente 12.75 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale MILE decimale		Settembre	assente		14.88	MJ/m2			
Novembre assente 12.75 MJ/m2 Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale Novembre		Ottobre	presente tutto il g	giorno	5.91	MJ/m2			
Dicembre assente 11.10 MJ/m2 Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale		Novembre	assente		12.75	MJ/m2			
Radiazione globale annua sulla superficie inclinata: 4655 MJ/m2 (anno convenzionale di 365.25 giorni) Scarica il file dei risultati in una delle due versioni: formato csv con la virgola come separatore decimale formato csv con il punto come separatore decimale		Dicembre	assente		11.10	MJ/m2			
Nota: i file <i>csv</i> (Comma Separated Values) sono normali file di testo che vengono aperti da tutti i programmi per i fogli di calcolo, quali <i>Excel</i> del pacchetto Microsoft Office o <i>Calc</i> di OpenOffice.org. Per separare la parte decimale nei dati numerici, è possibile usare sia la <i>virgola</i> (convenzione italiana) sia il <i>punto</i> (convenzione scientifica internazionale). La scelta dipende dalle impostazioni del proprio sistema operativo; nei computer dotati del sistema operativo Microsoft Windows in versione italiana, per impostazione predefinita il separatore decimale è la virgola.		Radiazione (anno conve Scarica il format Nota: per i fo decim scient dotati decim	globale annua sulla supe nzionale di 365.25 giorr file dei risultati in u o csv con la virgola con o csv con il punto come file csv (Comma Separ ogli di calcolo, quali Exc ale nei dati numerici, è p fica internazionale). La del sistema operativo M ale è la virgola.	erficie inclinat ni) Ina delle du me separatore e separatore rated Values) cel del pacche possibile usar scelta dipendi ficrosoft Wind	a: 4655 N le version e decimale decimale sono norri tto Micros re sia la v e dalle im lows in ve	IJ/m2 oni: e mali file di soft Office irgola (cor postazioni rsione itali	testo ch o Calc o wenzior i del pro ana, pe	ie vengono aperti da di OpenOffice.org. P le italiana) sia il <i>pun</i> iprio sistema operat r impostazione prec	a tutti i programmi 'er separare la parte <i>to</i> (convenzione ivo; nei computer lefinita il separatore

Figura 20 - Esempio di calcolo della radiazione solare globale giornaliera media mensile: pagina finale. La pagina riassume i dati immessi dall'utente, mostra i risultati del calcolo e offre la possibilità di 'scaricare' un file in un formato facilmente importabile negli usuali programmi per fogli di calcolo. Nelle pagine relative alla immissione dei dati, erano state indicate le coordinate di Roma ed era stato richiesto il calcolo per una parete verticale (inclinazione=90°) orientata a Sud (azimut=0°); inoltre, era stato supposto che il suolo riflettente sia assimilabile a quello degli edifici con pareti chiare (coefficiente=0.6, come si evince dalla tabella UNI consultabile all'interno dello stesso sito); infine, è stato intenzionalmente imposto per i mesi di aprile, maggio, luglio e ottobre la presenza di ostacoli che si interpongono fra Sole e superficie captante, con l'indicazione degli intervalli temporali relativi.

ENEN Brogetto Solaro Termo dinemico	SOL/RS/2007/21	Pag 41 di 45
	Distr. LIBERA	1 ug. 11 ul 10



Figura 21 – Elaborazione di dati ottenuti con il programma di calcolo dell'Atlante: grafico del profilo annuale della radiazione globale giornaliera media mensile al suolo per la località di Roma. I risultati documentano tre situazioni differenti: superficie orizzontale, parete verticale esposta a Sud (con coefficiente di riflessione molto alto), la medesima parete con presenza di ostacoli che - limitatamente ai mesi di aprile, maggio, luglio e ottobre - intercettano i raggi diretti. Si può constatare che alle nostre latitudini una superficie verticale esposta a Sud è 'investita' da una quantità di radiazione solare maggiore rispetto ad un'altra disposta orizzontalmente; il contrario avviene nei mesi estivi. Con il programma è possibile studiare tutte le situazioni intermedie e ricavare indicazioni sull'orientazione ottimale delle superfici captanti degli impianti solari.

Coma già detto il sito dell'*Atlante* è pienamente operativo per la sezione del *Calcolo* ma, come lascia trasparire il nome, verrà man mano arricchito:

- a) con la pubblicazione dei dati di radiazione dell'archivio ENEA;
- b) di una versione del sistema di previsione della radiazione.

Per quanto riguarda la sezione archiviale, sul nuovo sito saranno pubblicate sia le misure a terra della rete attinometrica ENEA-SOLTERM, sia le nuove e più dettagliate mappe di stima della radiazione ricavate dalle immagini satellitari, che amplieranno e aggiorneranno fino ai giorni nostri quelle già rese disponibili nel precedente sito dell'*Archivio Climatico ENEA-DBT*.

7. Simboli usati



Simbolo	Definizione	Unità di misura
С	Copertura nuvolosa (metodo della previsione)	
DNI	Direct Normal Irradiation (= irraggiamento normale diretto)	
\overline{H}	Radiazione solare <i>globale</i> giornaliera media mensile (su superfi- cie orizzontale)	J/m^2
\overline{H}_{b}	Radiazione solare <i>diretta</i> giornaliera media mensile (su superfi- cie orizzontale)	J/m^2
\overline{H}_{d}	Radiazione solare <i>diffusa</i> giornaliera media mensile (su superfi- cie orizzontale)	J/m^2
$\overline{H}_{\scriptscriptstyle incl}$	Radiazione solare globale giornaliera media mensile su superfi- cie <i>inclinata</i>	J/m^2
H_{mis}	Radiazione solare globale giornaliera (misurata)	J/m^2
H_{st}	Radiazione solare globale giornaliera (stimata)	J/m^2
Ι	Radiazione solare	J/m^2
İ	Irradianza	W/m^2
I _{bn}	Radiazione diretta su piano normale	J/m^2
I_d	Radiazione diffusa su piano orizzontale	J/m^2
I_o	Radiazione solare extra-atmosferica	J/m^2
İ _o	Irradianza extra-atmosferica	J/m^2
\dot{I}_n	Irradianza (su piano) normale (ai raggi incidenti)	W/m^2
İ,	Potenza della radiazione per unità di superficie, riflessa dallo strato fittizio (modello Solarmet)	W/m^2
\dot{I}_{sc}	Costante solare	W/m^2
ICN	Indice di copertura nuvolosa	adimensionale
K_T	Coefficiente di trasmissione globale (attraverso l'atmosfera)	adimensionale
\overline{R}_{b}	Fattore d'inclinazione per la radiazione solare diretta giornaliera media mensile	adimensionale
\overline{R}_{d}	Fattore d'inclinazione per la radiazione solare diffusa giornaliera media mensile	adimensionale
\overline{R}_r	Fattore d'inclinazione per la radiazione solare riflessa giornaliera media mensile	adimensionale
eta	Angolo d'inclinazione	rad
γ	Angolo azimutale	rad
$ ho$, $ ho_{\scriptscriptstyle suolo}$	Albedo di riferimento (del suolo)	adimensionale
$ ho_{\scriptscriptstyle m max}$	Albedo, valore massimo (nubi)	
${oldsymbol{ ho}_{\scriptscriptstyle t}}$	Albedo attuale	
θ	Angolo d'incidenza dei raggi solari	rad

ENEN Brogotto Coloro Tormo dinamico	SOL/RS/2007/21	Pag 43 di 45
	Distr. LIBERA	1 ug. 10 th 10

O_z Angolo Zemitale

Nota: I termini 'irraggiamento' e 'radiazione' ricorrono usualmente sia in senso generico, sia con significato 'tecnico', rispettivamente di irradianza e di esposizione radiante.

Le unità di misura J/m^2 , MJ/m^2 e kWh/m^2 sono dimensionalmente equivalenti; la prima è unità SI, ma per gli scopi pratici sono usate abitualmente le altre due.



Bibliografia 8.

- Clisun Archivio Climatico ENEA-DBT, sito Internet 1. (web: http://clisun.casaccia.enea.it); contiene – tra l'altro – le mappe della radiazione globale giornaliera media mensile 1994-1999 ed i valori stimati per 1614 località uniformemente distribuite sul territorio italiano. Tutto il materiale è liberamente 'scaricabile'.
- 2. SolarItaly - Atlante italiano della radiazione solare, sito Internet (web: <u>http://www.solaritaly.enea.it</u>).
- D. Cano, J.M. Monget, M. Albuisson, H. Guillard, N. Regas, L. Wald (1986), "A 3. method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data", Solar Energy, 37, 31-39, Elsevier.
- E. Cogliani, D. Malosti, M. Mancini e S. Petrarca (1993), "Stima della radiazione solare 4. globale al suolo dalle immagini secondarie del satellite Meteosat", HTE Energie alternative, 85, 268-273.
- 5. S. Petrarca, E. Cogliani, F. Spinelli (2000), La radiazione solare globale al suolo in Italia. Anni 1998 e 1999 e media 1994-1999, ENEA, Roma.
- E. Cogliani, P. Ricchiazzi, A. Maccari (2007), "Physical model SOLARMET for deter-6. minating total and direct solar radiation by meteosat satellite images", Solar Energy, 81, 791-798, Elsevier.
- 7. P. Ricchiazzi, S.R. Yang, C. Gautier, D. Sowle, (1998), "SBDART: a research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere", Bull. Am. Meteorol. Soc., 79, 2101-2114.
- S. Marullo, G. Dalu, A. Viola (1987), " Incident short-wave radiation at surface from 8. Meteosat data", Il Nuovo Cimento, 10C, 77-90.
- 9. C. Gautier, G.R. Diak, S. Masse (1980), "A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data", J. Appl. Meteorol., 19, 1005-1012.
- 10. Norma UNI 8477, Parte 1^a, "Energia solare. Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia. Valutazione dell'energia raggiante ricevuta" (1983).
- 11. Norma UNI 10349, "Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici" (1994).
- 12. E. Cogliani, "Previsione di radiazione solare diretta" (2005), Documento non pubblicato, ENEA.
- F. Fiorenza (2003), "Studio ed implementazione di metodi di previsione a breve ter-13. mine dell'intensità di radiazione solare diretta", tesi di laurea, Università degli studi di Roma "La Sapienza"-ENEA.



Ringraziamenti 9.

Si ringraziano i colleghi Aldo Bastianelli, Arcangelo Benedetti, Giuseppe Cara, Giancarlo Caselli, Mauro Giorgetti, Massimo Mancini, Michele Mastrosimone, Roldano Siviero e Franco Treppo, che hanno contribuito in passato o partecipano tuttora alle attività descritte nell'articolo.