

Erminia Leonardi

CRS4, Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia,
Parco Scientifico e Tecnologico, Sardegna Ricerche, Edificio 1, 09010 PULA (CA - Italy)

(Dated: 6 agosto 2008)

I. ABSTRACT

Nel presente lavoro viene descritto il metodo utilizzato per determinare la quantità di energia, proveniente dal sole, raccolta da un campo di specchi parabolici lineari. Viene introdotto il concetto di *effetto coseno*, che rappresenta la differenza tra la quantità di energia proveniente dal sole raccolta su una superficie ortogonale ai raggi solari e quella raccolta su una superficie inclinata rispetto ai raggi solari. Inoltre, supponendo che gli specchi si trovino su una superficie piana, e quindi siano tutti alla stessa altezza, ed ordinati in file consecutive, viene dimostrato come la disposizione ottimale preveda file equidistanziate. Infine, per tale sistema viene mostrato come calcolare l'ombra prodotta sul campo di specchi in funzione della posizione del sole. Preso a titolo esemplificativo, il sito di Cagliari, viene mostrata l'efficienza di raccolta dell'energia solare sia per l'orientazione NORD-SUD che EST-OVEST.

II. DEFINIZIONE DEGLI ANGOLI DI INTERESSE

L'energia solare incidente sulla superficie terrestre è una funzione complessa della latitudine e varia, ovviamente, in funzione della posizione del sole, momento per momento, sulla volta celeste. Tale posizione è definita da due angoli: l'angolo di zenith e l'angolo di azimuth. In particolare,

- α (zenith) è l'angolo che il raggio solare forma con la normale alla superficie terrestre;
- γ (azimuth) è l'angolo formato dalla proiezione dei raggi solari sulla superficie terrestre con la linea SUD/NORD. Per convenzione $\gamma > 0$ per proiezioni nel quadrante SUD/OVEST (pomeriggio) e $\gamma < 0$ per proiezioni nel quadrante SUD/EST (mattina). $\gamma = 0$ alle 12.00 (ora solare);

Gli angoli di zenith e di azimuth dipendono dalla latitudine, dal giorno e dall'ora del giorno e sono calcolati come indicato di seguito.

Si calcola, innanzitutto, la declinazione solare, vale a dire l'angolo tra un piano perpendicolare alla congiungente Terra Sole e l'asse di rotazione terrestre.

$$\begin{aligned} \delta_s = & 0.006918 - 0.399912 \times \cos(\tau_d) + \\ & + 0.070257 \times \sin(\tau_d) - 0.006758 \times \cos(2\tau_d) + \\ & + 0.000907 \times \sin(2\tau_d) - 0.002697 \times \cos(3\tau_d) + \\ & + 0.001480 \times \sin(3\tau_d), \end{aligned} \quad (1)$$

dove $\tau_d = 2\pi \frac{\text{day}-1}{365.0}$. Successivamente si calcola l'angolo orario, ω , che rappresenta la posizione del sole rispetto all'asse NORD-SUD, misurata nel piano equatoriale, e dipende dall'ora solare, LT . (Per avere l'ora solare dall'ora locale occorre aggiungere $(\text{Longlocal}-\text{Longsm})/15$, dove Longlocal è la longitudine del punto di osservazione, in gradi, e Longsm è la longitudine del meridiano di riferimento della zona oraria)

$$\omega = -15.0(LT - 12.0) \quad (2)$$

Infine, calcoliamo zenith ed azimuth in funzione delle grandezze definite sopra:

$$\alpha = \arccos[\sin(\delta_s) \sin(\text{lat}\pi/180.0) + \cos(\delta_s) \cos(\text{lat}\pi/180.0) \cos(\omega\pi/180.0)] \quad (3)$$

$$h = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (4)$$

$$\gamma = \arccos \left[\frac{\sin(\text{lat}\pi/180.0) \sin(h) - \sin(\delta_s)}{\cos(\text{lat}\pi/180.0) \cos(h)} \right] \quad (5)$$

dove lat è la latitudine, espressa in gradi, ed h è l'altitudine.

L'inclinazione di uno specchio rispetto ai raggi solari necessita dell'introduzione di altri due angoli, β e θ :

- β è l'angolo che il raggio solare forma con l'asse dello specchio parabolico lineare;
- θ è l'angolo che il raggio solare forma con la superficie terrestre.

La disposizione dello specchio rispetto al sole e gli angoli di interesse, α , γ , β e θ , sono mostrati in Fig. 1.

Gli angoli β e θ sono una funzione di α e γ :

$$\beta = \arccos[\sin(\alpha) \sin(\gamma_{loc})] \quad (6)$$

$$\theta = \arccos[\sin(\alpha) \cos(\gamma_{loc}) / \sin(\beta)], \quad (7)$$

con $\gamma_{loc} = \rho + \gamma$, dove ρ è l'angolo che indica di quanto l'asse degli specchi è ruotato rispetto alla direzione EST-OVEST: infatti cambiare orientazione degli specchi corrisponde a cambiare orientazione del solare, introducendo, appunto, un angolo di azimuth locale. Questo significa che, per specchi orientati nella direzione NORD-SUD, $\rho = \frac{\pi}{2}$.

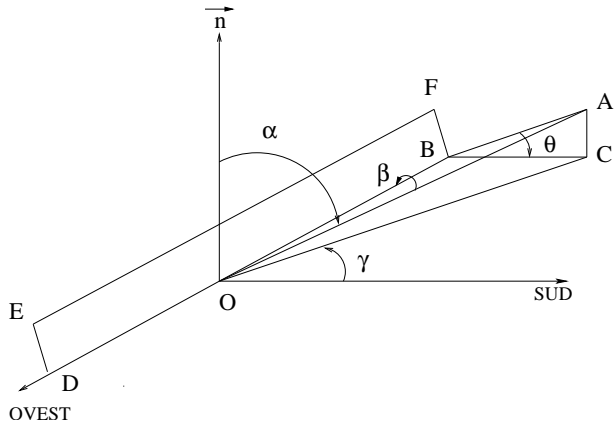


Figura 1: Sistema di assi di riferimento. La superficie dello specchio è sul piano BDEF, il sole si trova nel punto A.

III. IL CAMPO SOLARE

Il campo solare si trova su una superficie piana perfettamente orizzontale e gli specchi sono tutti posizionati alla stessa altezza.

Nel campo solare gli specchi sono disposti in linee secondo l'orientamento prescelto, con una distanza d tra due linee contigue. Gli specchi parabolici sono costantemente orientati in modo che il piano dello specchio BDEF sia ortogonale al piano AOB di figura 1.

Gli specchi sono considerati piani e di forma rettangolare con lunghezza L ed altezza a (a è l'apertura dello specchio).

A. Calcolo dell'effetto coseno e delle ombre

1. Caso limite di lunghezza infinita degli specchi

In assenza di ombre sugli specchi la superficie illuminata è $n \times a \times L$, dove n è il numero delle file di specchi. In questo modo si introduce un errore sia al bordo OVEST che al bordo EST per $\gamma \neq 0$. Supporremo questi errori trascurabili.

Per valutare l'effetto delle ombre, consideriamo prima di tutto il caso in cui le file di specchi abbiano lunghezza infinita (cioè quando possiamo trascurare gli effetti al bordo che si presentano quando $\gamma \neq 0$). In questo caso la trattazione si presenta particolarmente semplice, come è rappresentato in Fig. 2.

In questo caso un campo con n file di specchi ha come area illuminata la somma di:

- $a l$: area del primo specchio.
- $(n - 1) d \sin \theta l$ se $d \sin \theta \leq a$, altrimenti $(n - 1) a l$.
Nota: se $d \sin \theta > a$ non c'è ombra del primo specchio sul secondo.

Introducendo la variabile altezza efficace a_{eff}

$$a_{eff} = \begin{cases} d \sin \theta & \text{se } d \sin \theta \leq a \\ a & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (8)$$

raggi solari

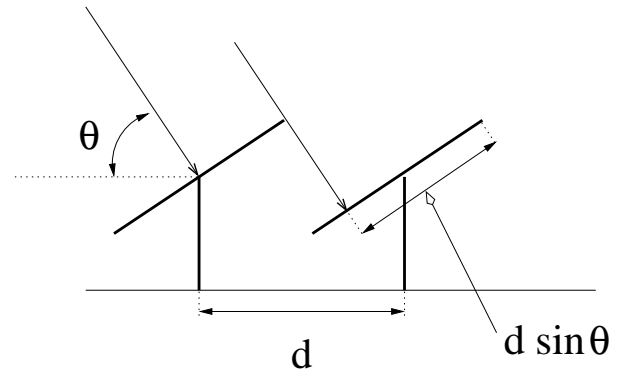


Figura 2: Rappresentazione di un campo di specchi parabolici. Visione da EST. Solo due file di specchi sono rappresentati.

L'area illuminata risulta essere

$$A_{ill} = l [a + (n - 1) a_{eff}] \quad (9)$$

Tenendo conto che questa superficie non è ortogonale alla direzione dei raggi del sole (lo è solo quando $\beta = \frac{\pi}{2}$) l'area efficace, A_{eff} (proiezione della parte illuminata dello specchio su un piano ortogonale ai raggi solari) è

$$A_{eff} = A_{ill} \sin \beta = A_{ill} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \quad (10)$$

Dove $\cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right)$ rappresenta il cosiddetto "effetto coseno"

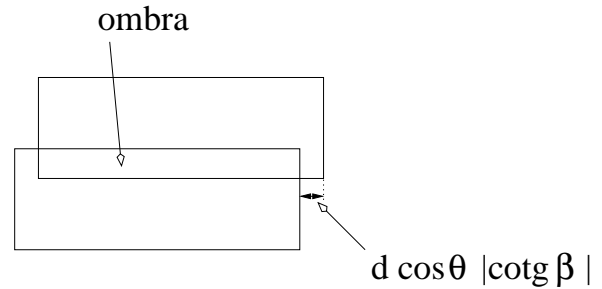


Figura 3: Rappresentazione di un campo di specchi parabolici. Visione dal punto di vista del sole. Solo due file di specchi sono rappresentati.

2. Introduzione degli effetti di bordo.

Notiamo che se consideriamo i piani di due specchi questi piani sono paralleli e distano $d \cos \theta$ (vedi Fig. 2). Nel caso $\beta \neq \frac{\pi}{2}$, mettendosi dal punto di vista del sole, le file di specchi si presentano come un insieme di superfici rettangolari leggermente sfalsate, come riportato in Fig. 3.

Tenendo conto di questo effetto, A_{ill} deve essere modificata, assumendo la seguente espressione:

$$A_{ill} = l [a + (n - 1) a_{eff}] + (n - 1) d \cos \theta |\cot \beta| (a - a_{eff}) \quad (11)$$

ed infine

$$A_{eff} = A_{ill} \sin \beta \quad (12)$$

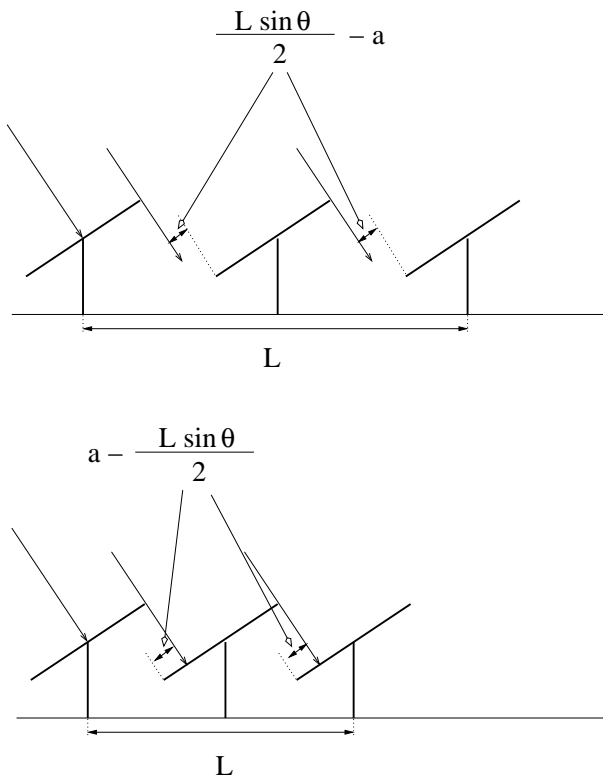


Figura 4: Rappresentazione di un campo di specchi parabolici. Visione da EST. Caso particolare con tre file di specchi. Ottimizzazione delle posizione della fila centrale.

3. Una semplice considerazione sull'ottimizzazione della distanza tra gli specchi.

Consideriamo il caso particolare con tre file di specchi, in cui la distanza tra la prima e la terza fila è fissa (indicata con L) e cerchiamo la posizione ottimale della seconda fila. Supponiamo di porre la seconda fila esattamente a metà tra la prima e la terza fila. Si hanno due casi

- $L \sin \theta > 2a$ (Fig. 4 parte in alto). In questo caso tutte e tre le file di specchi sono pienamente illuminate. Se spostiamo la fila centrale rispetto al centro, questa situazione permane per spostamenti minori di $\frac{L}{2} - \frac{a}{\sin \theta}$, dopo di che una fila comincia ad essere in ombra e l'area illuminata diminuisce.

- $L \sin \theta < 2a$ (Fig. 4 parte in basso). In questo caso la prima fila crea un'ombra sulla seconda e la seconda la crea sulla terza. Notiamo che l'area utile è una funzione lineare della distanza tra due file di specchi, pertanto l'area utile è invariante per spostamento della seconda fila dalla posizione centrale per spostamenti minori di $\frac{a}{\sin \theta} - \frac{L}{2}$, dopo di che l'area illuminata diminuisce.

Possiamo concludere che in questo semplice modello, l'area illuminata è massima per file equispaziate. Il valore massimo viene mantenuto per spostamenti della seconda fila dalla posizione centrale che non siano maggiori di $|\frac{a}{\sin \theta} - \frac{L}{2}|$. Sembra ragionevole pertanto supporre tutte le file equispaziate in un campo con n file di specchi.

IV. IL CODICE SUNCOLLECTION

Il codice di calcolo SUNCOLLECTION, scritto in FORTRAN77, permette di calcolare l'energia solare raccolta da un campo di specchi parabolici lineari. Per fare questo richiede delle seguenti informazioni di INPUT:

- latitudine e longitudine del sito;
- irraggiamento solare sul sito;
- caratteristiche del campo solare (lunghezza e numero delle file di specchi, distanza tra una fila e la successiva, apertura degli specchi;
- orientazione degli specchi

Per irraggiamento solare si intende la radiazione solare che arriva su una superficie ortogonale alla direzione dei raggi solari, e di seguito verrà chiamata DNI (direct normal irradiation). Il codice legge la DNI, in Wh/m^2 , per ogni ora dell'anno. L'orientazione degli specchi è indicata da un angolo, che rappresenta di quanto l'asse degli specchi è ruotato rispetto all'asse EST-OVEST. Poiché la DNI letta dal codice rappresenta l'energia raccolta ogni ora (abbiamo supposto, in assenza di informazioni più dettagliate, che tale ora sia quella precedente), l'area illuminata efficace corrispondente è il valore medio calcolato durante tale ora. Ogni ora viene, dunque, divisa in dieci periodi temporali uguali, per ognuno dei quali viene calcolata l'area illuminata efficace; infine, si determina il suo valore medio.

L'OUTPUT del codice fornisce diverse informazioni:

- $\alpha, \gamma, \beta, \theta = f(\text{giorno, ora})$;
- area illuminata media (m^2) = $f(\text{giorno, ora})$;
- energia solare raccolta (Wh/m^2) = $f(\text{giorno, ora})$ per il solo effetto coseno;
- energia solare raccolta (Wh/m^2) = $f(\text{giorno, ora})$ per effetto coseno ed effetto ombra;

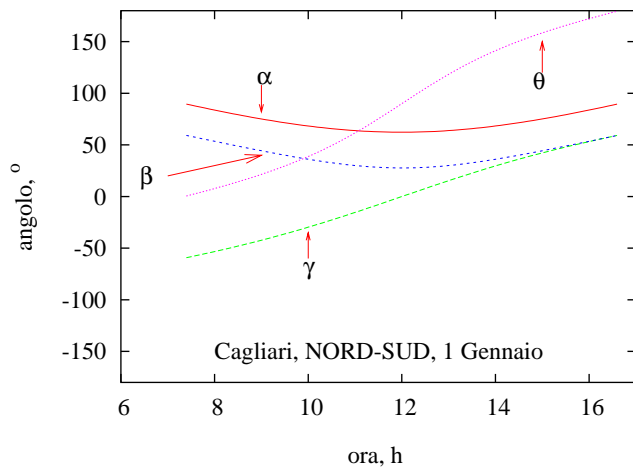


Figura 5: Cagliari, orientazione NORD-SUD. Variazione degli angoli di zenith, azimuth, β e θ in funzione delle ore nelle giornate durante il 1 Gennaio.

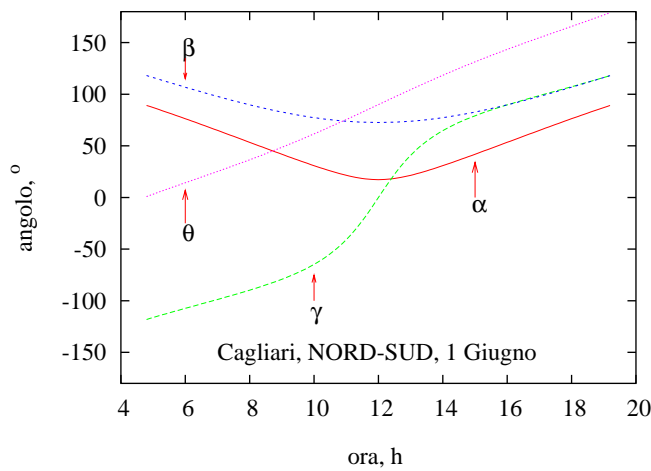


Figura 6: Cagliari, orientazione NORD-SUD. Variazione degli angoli di zenith, azimuth, β e θ in funzione delle ore nelle giornate durante il 1 Giugno.

V. STUDIO DI UN CAMPO SOLARE IN UN SITO DI INTERESSE: CAGLIARI

Si suppone il campo solare localizzato a Macchiareddu (Cagliari) (latitudine: $39^{\circ}:15' N$, longitudine: $8^{\circ}:57' E$), e costituito da 78 file di specchi parabolici lineari, equidistanziati di 17.5 m, lunghi 1200 m, e con un'apertura degli specchi di 5.45 m. I dati di DNI sono dati satellitari, relativi alla zona industriale del CASIC (Cagliari), sono stati acquisiti dal DRL (German Aerospace Center) sono corrispondono all'irraggiamento durante il 2005, a 20 m di altezza dal suolo. È stata considerata sia l'orientazione NORD-SUD che EST-OVEST delle file di specchi. Le Fig. 5 e 6 mostrano la variazione degli angoli α , γ , β e θ in funzione delle ore, durante il 1 Gen-

naio ed il 1 Giugno, nel caso di orientazione NORD-SUD del campo solare.

La Fig. 7 confronta la variazione della sezione efficace degli specchi il 1 Gennaio ed il 1 Giugno, nel caso di orientazione NORD-SUD del campo solare.

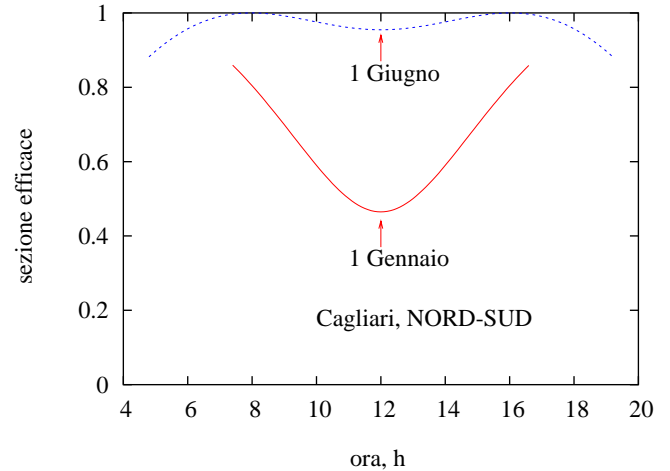


Figura 7: Cagliari, orientazione NORD-SUD. Variazione della sezione efficace ($=\sin\beta$) in funzione delle ore nelle giornate del 1 Gennaio e 1 Giugno.

Le Fig. 8 e 9 mostrano la variazione degli angoli α , γ , β e θ in funzione delle ore, durante il 1 Gennaio ed il 1 Giugno, nel caso di orientazione EST-OVEST del campo solare.

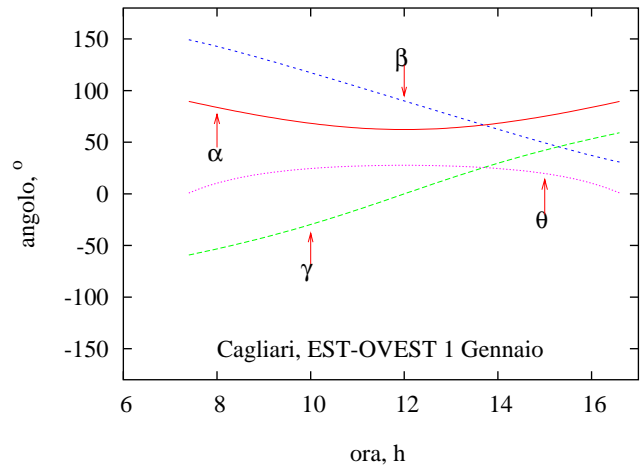


Figura 8: Cagliari, orientazione EST-OVEST. Variazione degli angoli di zenith, azimuth, β e θ in funzione delle ore del 1 Gennaio.

La Fig. 10 confronta la variazione della sezione efficace degli specchi il 1 Gennaio ed il 1 Giugno, nel caso di orientazione EST-OVEST del campo solare.

In Fig. 11 viene graficata la media mensile di $\frac{dni \times \sin\beta}{dni} \times 100$ corrispondente all'orientazione NORD-SUD ed EST-

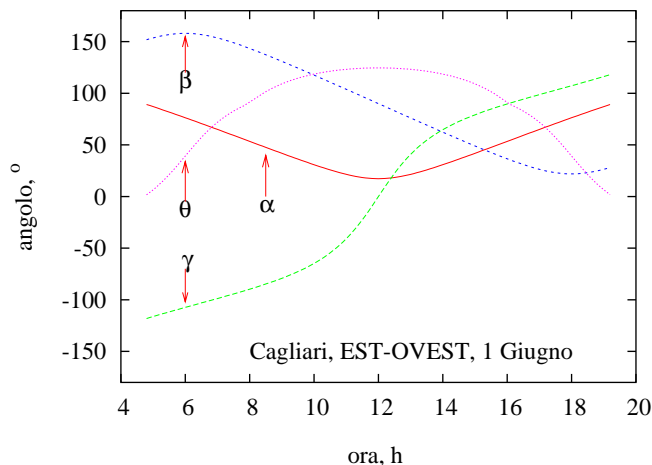


Figura 9: Cagliari, orientazione EST-OVEST. Variazione degli angoli di zenith, azimuth, β e θ in funzione delle ore nelle giornate del 1 Giugno.

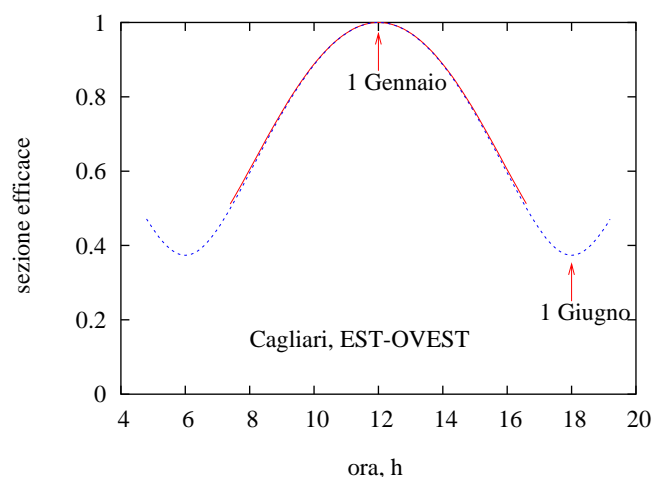


Figura 10: Cagliari, orientazione EST-OVEST. Variazione della sezione efficace ($=\sin\beta$) in funzione delle ore nelle giornate del 1 Gennaio e 1 Giugno.

OVEST. Si può notare che l'orientazione NORD-SUD è favorita nel periodo estivo e quella EST-OVEST nel periodo invernale.

Poiché l'intensità della radiazione solare è maggiore in estate, la configurazione NORD-SUD risulta quella preferibile. Nel caso specifico di Cagliari, con l'orientamento NORD-SUD si raccoglie il 82.0 % della DNI; in particolare, l'effetto coseno riduce la quantità di energia solare raccolta dagli specchi del 13.0 %, e l'effetto delle ombre contribuisce per un ulteriore 5.0 %. Talvolta può risultare opportuno raccogliere l'energia solare, solo se questa supera una certa soglia. Per esempio, porre tale soglia a 100 Wh/m^2 , significherebbe, nel caso specifico trascurare annualmente la raccolta del 2.99 % della DNI.

Per quanto riguarda l'orientamento EST-OVEST si raccoglie il 72.9 %; in particolare, l'effetto coseno riduce la quantità di energia solare raccolta dagli specchi del 26.4 %, e l'effetto delle ombre contribuisce per un ulteriore 0.7 %. In questo caso, trascurare la raccolta di tutta l'energia sotto la soglia dei 100 Wh/m^2 , comporta annualmente la perdita di circa il 3.57 % della DNI.

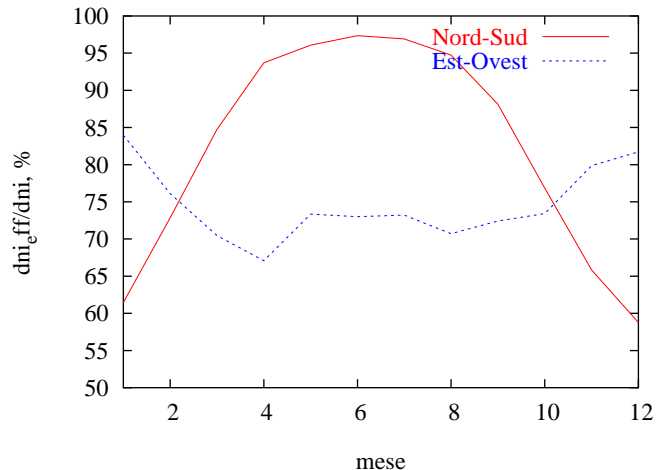


Figura 11: Località: Cagliari. Confronto dell'efficienza di raccolta dell'energia solare tra l'orientazione NORD-SUD ed EST-OVEST, considerando i valori medi mensili.

L'effetto della distanza tra le file di specchi è stato analizzato sia per l'orientazione NORD-SUD che EST-OVEST del campo solare. L'effetto ombra è maggiore nel caso dell'orientazione NORD-SUD, come si può vedere dalla Fig. 12. Infine, in Fig.13 viene graficata per le due orientazioni la percentuale di DNI raccolta dal campo solare (effetto ombra+effetto coseno)

La Tab. I riassume le caratteristiche dell'ipotetico campo solare di Macchiareddu.

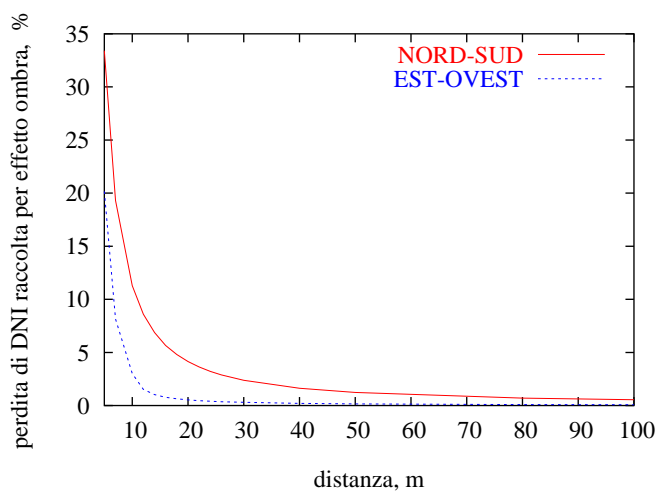
VI. CONCLUSIONI

Nel seguente lavoro è stato discusso il calcolo dell'effetto coseno e delle ombre su un campo solare di specchi parabolici lineari. Sono state descritte le equazioni per il calcolo degli angoli che definiscono la posizione del sole (zenith ed azimuth) in funzione della latitudine e longitudine, e la posizione degli specchi solari (β e θ) rispetto al sole. È stato descritto l'algoritmo di calcolo implementato nel codice SUNCOLLECTION.f. Tale codice di calcolo permette di studiare campi di specchi parabolici orientati secondo qualsiasi asse. Si è dimostrato che le linee di specchi devono essere equidistanziate.

A titolo esemplificativo, è stato studiato un ipotetico campo solare localizzato a Macchiareddu, utilizzando dati di DNI registrati durante il 2005. Sono state prese in considerazione sia l'orientazione NORD-SUD che EST-OVEST dell'asse degli specchi, si è mostrato come la prima orientazione

Tabella I: Caratteristiche del campo solare di Macchiareddu

Sito	Macchiareddu (Cagliari)
Latitudine	39°:15' N
Longitudine	8°:57' E
Area campo solare (m ²)	510120
apertura specchi (m)	5.45
lunghezza di ogni linea di specchi (m)	1200
n° di linee di specchi	78
distanza tra le linee (m)	17.5
DNI annuale (kWh/m ²)	1694.35
Orientazione NORD-SUD:	
Energia raccolta (solo effetto coseno) (kWh/m ²)	1473.67 (87.0 % della DNI)
Energia raccolta (effetto coseno+ombre) (kWh/m ²)	1389.09 (82.0 % della DNI)
Orientazione EST-OVEST:	
Energia raccolta (solo effetto coseno) (kWh/m ²)	1247.15 (73.6 % della DNI)
Energia raccolta (effetto coseno+ombre) (kWh/m ²)	1235.86 (72.9 % della DNI)



sia quella favorita. In particolare, l'orientazione NORD-SUD risulta la migliore durante l'estate, mentre l'orientazione EST-OVEST risulta migliore durante l'inverno. Pertanto, essendo l'irraggiamento solare di gran lunga maggiore in estate, l'orientazione NORD-SUD risulta essere la scelta più efficiente. L'effetto coseno pesa per il 13 % sull'efficienza di raccolta nell'orientamento NORD-SUD e per circa il 26 % nell'orientazione EST-OVEST. L'effetto delle ombre invece pesa per il 5 % nel caso di orientazione NORD-SUD e solo circa lo 0.7 % nel caso di orientazione EST-OVEST, nel caso particolare di specchi distanziati di 17.5 m.

Figura 12: Località: Cagliari. Percentuale della DNI persa per effetto ombra al variare della distanza tra le file di specchi, per l'orientazione NORD-SUD ed EST-OVEST.

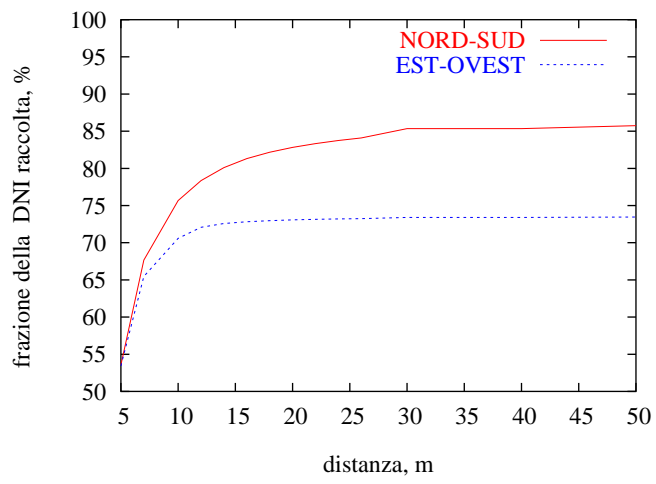


Figura 13: Localit`a: Cagliari. Percentuale della DNI raccolta dal campo solare in funzione della distanza tra le fi le di specchi.