

# VALUTAZIONE MEDIANTE TECNICA FOTOGRAFICA DELL'OSCURAMENTO DELLA RADIAZIONE SOLARE DOVUTO ALLE OSTRUZIONI

Valerio Lo Brano\*, Aldo Orioli\*, Alessandra Di Gangi\*

\*Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM), Università degli studi di Palermo  
Viale delle scienze, Edificio 9, 90128 Palermo

[lobrano@dream.unipa.it](mailto:lobrano@dream.unipa.it), [orioli@dream.unipa.it](mailto:orioli@dream.unipa.it), [alessandradigangi@dream.unipa.it](mailto:alessandradigangi@dream.unipa.it)

## SOMMARIO

Si propone un nuovo metodo che consente di utilizzare l'immagine fotografica di ostacoli ombreggianti per valutarne l'effetto oscurante nei confronti della radiazione solare diretta incidente su di una superficie. Il metodo proposto è simile a quello che prevede l'impiego del diagramma cilindrico dei percorsi solari, calcolati in funzione dell'azimuth e dell'altezza solare, e la sovrapposizione su di esso del poligono raffigurante l'oggetto ostruente costruito in base alle coordinate cilindriche dei suoi punti più significativi. La nuova procedura prevede invece la sovrapposizione sulla fotografia del percorso solare opportunamente trasformato secondo le regole della prospettiva. E' così possibile tracciare direttamente sulla foto la posizione assunta dal sole agli orari richiesti per qualunque giorno dell'anno e località, utilizzando a tale scopo la conoscenza di un numero estremamente limitato di dati, peraltro facilmente reperibili. Le porzioni del percorso intercettate dal contorno degli ostacoli rappresentati nell'immagine fotografica indicano le fasce orarie durante le quali il punto della superficie ricevente risulta ombreggiato. Viceversa i restanti tratti del percorso solare evidenziano la presenza della componente diretta radiazione. Sono presentati, inoltre, i risultati del confronto tra i dati calcolati e quelli sperimentali condotti presso il Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali (DREAM) di Palermo.

## 1. INTRODUZIONE

La valutazione della quantità di energia solare che raggiunge una superficie è di fondamentale importanza sia nella stima delle rese dei pannelli fotovoltaici, o in genere dei collettori solari, che nel controllo della radiazione solare all'interno degli edifici ai fini del raggiungimento del confort ambientale. In particolare la componente diretta di tale radiazione, a cui è in genere associato il contributo energetico più rilevante, è quella che riveste il ruolo più significativo. E' noto infatti che la riduzione, anche minima, dell'area della superficie di un pannello fotovoltaico colpita dalla radiazione diretta può influire drasticamente sulla corrente complessivamente prodotta dal componente solare [1], così come l'ottimizzazione del suo contributo è un requisito indispensabile nella progettazione degli edifici solari passivi. Conseguentemente il ruolo rivestito da eventuali oggetti ostruenti è determinante nella stima della radiazione solare effettivamente incidente su una superficie.

Molti sono i metodi utilizzati per la determinazione delle componenti solari diretta e diffusa della radiazione solare su una superficie comunque inclinata [2] [3] [4] [5] [6] [7]. Tali metodi, considerati certamente affidabili, sono stati impiegati in più località e recentemente validati sperimentalmente [8] e ulteriormente migliorati [9]. Tali metodi altamente sofisticati costituiscono un valido supporto per i progettisti impegnati nel raggiungimento dei migliori livelli di efficienza energetica e confort ambientale. Tuttavia questi metodi spesso valutano in modo approssimato il valore dell'irraggiamento ridotto a causa della presenza di superfici ombreggianti, ovvero ne consentono il calcolo attraverso procedure particolarmente complesse ed elaborate. D'altro canto la presenza nei contesti urbani di molteplici oggetti di forma complessa, quali alberi,

camini, antenne paraboliche, nonché montagne ed edifici, complica notevolmente la definizione delle geometrie delle ombre da essi prodotte. Al fine di ovviare a tali inconvenienti, gli Autori hanno proposto un nuovo metodo che, utilizzando le informazioni contenute nell'immagine fotografica del contesto, permette la riproduzione del percorso solare direttamente sulla fotografia. Con la conoscenza di soli tre angoli vengono così calcolati gli effetti di qualsivoglia ostruzione per forma e quantità. La procedura risulta idonea non solo per verificare l'adeguatezza di un sito all'inserimento di tecnologie solari, ma anche per la determinazione del contributo ombreggiante di eventuali elementi da apporre nell'edificio.

## 2. DUPLICE APPROCCIO NELLA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO OMBREGGIANTE

Per potere determinare l'ombra proiettata da un oggetto su una superficie è necessario, preliminarmente, definire la posizione del sole nella volta celeste che per un generico sito, data e ora del giorno, dipende dall'altezza solare ( $\beta_s$ ) misurata rispetto all'orizzonte e dall'azimuth ( $\varphi_s$ ) misurato a partire dalla direzione sud. Convenzionalmente, l'azimuth positivo individua una posizione del sole a sud-ovest, mentre quello negativo identifica il sole a sud-est. Questi angoli sono espressi in funzione della latitudine  $L$  del sito, della declinazione solare  $\delta$  e dell'ora solare apparente, definita come angolo orario  $H$ , attraverso le seguenti relazioni [10]:

$$\beta_s = \arcsin(\cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta) \quad (1)$$

$$\varphi_s = \arccos \left( \frac{\cos H \cos \delta \sin L - \sin \delta \cos L}{\cos \beta_s} \right) \quad (2)$$

L'angolo orario può essere calcolato con la seguente espressione:

$$H = 15(AST - 12) \quad (3)$$

dove l'ora solare apparente  $AST$  è:

$$AST = LST + ET / 60 + (LSM - LON) / 15 \quad (4)$$

in cui  $LST$  è riferita all'ora locale,  $ET$  è l'equazione del tempo,  $LSM$  è l'ora locale and  $LON$  è la longitudine. La declinazione solare e l'equazione del tempo possono essere ottenute con le seguenti equazioni [11].

$$\delta = a_0 + a_1 \cos(t_\delta) + a_2 \cos(2t_\delta) + a_3 \cos(3t_\delta) + a_4 \sin(t_\delta) + a_5 \sin(2t_\delta) + a_6 \sin(3t_\delta) \quad (5)$$

in cui

$$\begin{aligned} t_\delta &= 2\pi \frac{n_{day}}{366} & a_0 &= 0.322003 \\ a_1 &= -22.971 & a_2 &= -0.357898 \\ a_3 &= -0.14398 & a_4 &= 3.94638 \\ a_5 &= 0.019334 & a_6 &= 0.05928 \end{aligned}$$

e:

$$ET = b_0 + b_1 \sin(t_{ET}) + b_2 \sin(2t_{ET}) + b_3 \sin(3t_{ET}) + b_4 \sin(4t_{ET}) + b_5 \cos(t_{ET}) + b_6 \cos(2t_{ET}) + b_7 \cos(3t_{ET}) \quad (6)$$

in cui

$$\begin{aligned} t_{ET} &= \left[ 279.134 + (0.985647 \cdot n_{day}) \right] \frac{\pi}{180} \\ b_0 &= 5.0323 & b_1 &= -100.976 \\ b_2 &= -595.275 & b_3 &= 3.6858 \\ b_4 &= -12.47 & b_5 &= -430.847 \\ b_6 &= 12.5024 & b_7 &= 18.25 \end{aligned}$$

Una volta definita la posizione del sole, l'oscuramento della componente diretta della radiazione solare sulla superficie di riferimento può essere valutato verificando se l'oggetto oscurante non consente al sole di "vedere" la superficie o se, viceversa, è la superficie a non poter "vedere" il sole. Ciò implica una valutazione del problema secondo due differenti approcci, l'uno considerato dal punto di vista del sole, e l'altro dal punto di vista della superficie ricevente. Entrambi gli approcci sono stati adottati da molti autori con procedure sia manuali, sia computerizzate [12], [13], [14].

Il primo approccio è stato applicato per l'individuazione del volume massimo realizzabile senza precludere l'accesso di radiazione solare negli edifici, per prevedere la quantità di radiazione solare e di luce diurna in un edificio e in un ambiente urbano complesso, nonché per determinare le perdite di energia prodotte nei componenti fotovoltaici ombreggiati. Se da un lato tale approccio consente una precisa descrizione della geometria delle ombre sulla superficie considerata, con conseguente effettiva stima dell'area delle porzioni ombreggiate, dall'altro esso richiede una notevole quantità di

informazioni relative agli oggetti da rilevare che devono essere definiti con grande accuratezza nelle forme ed identificati nella loro posizione. Inoltre, poiché non è nota a priori la loro influenza, spesso è necessario definire anche gli oggetti posti a considerevole distanza dalla superficie ricevente. Si tratta quindi di procedure che richiedono tempi oggettivamente lunghi non soltanto per l'inserimento dei dati, ma anche per i successivi calcoli, specie qualora si volessero conoscere oltre ai valori di radiazione sulla superficie in una precisa ora del giorno anche quelli relativi all'intera distribuzione giornaliera.

Il secondo approccio, applicato da Quaschnig e Hanitsch [15], è basato sull'utilizzo dei diagrammi polari o cilindrici che consentono di descrivere il percorso solare durante l'anno. Tale approccio è stato impiegato per valutare la luce diurna e la radiazione solare all'interno di un contesto urbano e nello studio della durata della luce solare e nella definizione del più efficace ombreggiamento.

Al contrario del precedente, il metodo non richiede la conoscenza delle dimensioni e della distanza di ogni oggetto ostruente, ma solamente le coordinate cilindriche dei punti più significativi delle ostruzioni. Il metodo, che consente la determinazione della distribuzione giornaliera della radiazione simultaneamente per diversi giorni dell'anno, tuttavia presenta alcuni limiti. Infatti, poiché i risultati sono riferiti ad un fissato punto di osservazione, per potere valutare l'intera superficie ricevente è indispensabile ripetere i calcoli da più punti di riferimento. Inoltre, la corretta stima degli effetti ombreggianti di oggetti geometricamente complessi richiede un'accurata ricostruzione del contorno dell'ostruzione sotto forma di un poligono da sovrapporre al diagramma solare al fine di verificarne le intersezioni con il percorso del sole. Ciò implica la misura di una notevole quantità di coppie di angoli (zenitale e azimutale) relative ai vari vertici del poligono mediante strumenti quali la bussola e la livella a bolla, per maggiore precisione, il tacheometro o il teodolite. In più, la sagoma del poligono ricostruito sul diagramma solare risulta deformata e quindi non corrispondente al reale contorno degli oggetti considerati. Ne consegue la difficoltà di riscontro immediato circa l'eventuale discrepanza tra i dati misurati e quelli riportati.

La geometria degli oggetti ombreggianti è stata anche registrata per mezzo di fotografie scattate da obiettivi grandangolari [16] [17], o per mezzo di più foto ottenute con una macchina con obiettivo [18] [19]. Altri Autori [20] hanno anche usato una macchina digitale eseguendo l'elaborazione digitale delle immagini. Altri [21] hanno proposto di usare due o più foto scattate con obiettivi ad occhio di pesce allo scopo di costruire un'immagine tridimensionale degli oggetti circostanti.

### 3. IL NUOVO METODO PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO OMBREGGIANTE

#### Analogia tra fotografia e prospettiva

Il metodo descritto dagli Autori propone di invertire la procedura tracciando il percorso del sole direttamente sulla sagoma ombreggiante così come essa appare in realtà.

Affinchè la procedura possa essere correttamente eseguita, è necessario identificare le relazioni che intercorrono tra la rappresentazione prospettica propria della geometria descrittiva, che consente di costruire un oggetto dello spazio su un piano, e l'immagine fotografata. Il metodo della prospettiva consente una rappresentazione tridimensionale

dell'oggetto così come viene visto da un osservatore nella realtà. Alcuni dei raggi luminosi riflessi da un oggetto investito dalla luce convergono verso l'occhio dell'osservatore dandogli la sensazione della forma dell'oggetto. Gli elementi necessari per la rappresentazione prospettica di un oggetto sono costituiti dal punto di vista e dal piano di proiezione, detto quadro, posto tra l'oggetto e l'osservatore. La proiezione dei raggi di luce attraverso il quadro produce l'immagine dell'oggetto (Fig.1).

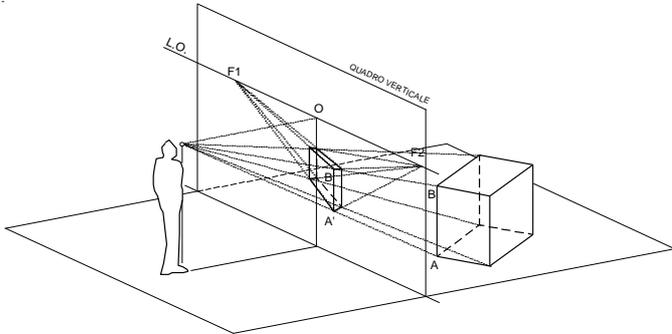


Fig.1. Schema della proiezione prospettica centrale

Per le caratteristiche della fotografia, l'immagine che passa attraverso l'obiettivo viene proiettata rovesciata e rimpicciolita sulla lastra retrostante. Considerando un piano tra l'oggetto e l'obiettivo posto ad una distanza pari a quella tra la lastra e l'obiettivo, le due immagini risultano uguali. Se si immagina di sostituire all'obiettivo il punto di vista ed al piano il quadro, si nota come la fotografia sia perfettamente analoga alla prospettiva ed obbedisca alle sue regole di trasformazione geometrica (Fig.2).

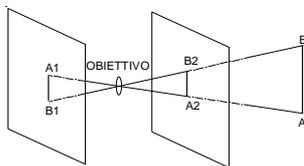


Fig.2. Schema delle regole fotografiche

L'immagine risulta più piccola quando l'osservatore si allontana dal quadro mantenuto fermo, viceversa, aumenta se l'osservatore si avvicina al quadro.

La rappresentazione prospettica può avere uno o più punti di fuga ( $F$ ) e il luogo delle fughe di tutte le rette orizzontali e non parallele al quadro, è costituito dalla linea d'orizzonte (L.O.), retta di intersezione tra il piano orizzontale contenente il punto di vista e il quadro.

La direzione del raggio visuale principale che passa attraverso l'occhio dell'osservatore ha un ruolo fondamentale perché la posizione del quadro è sempre perpendicolare a tale direzione. Possono, quindi, verificarsi più condizioni. Quando la direzione del raggio visuale è orizzontale, il quadro è verticale (Fig.3), se il raggio visuale è inclinato anche il quadro prospettico sarà inclinato (Fig.4).

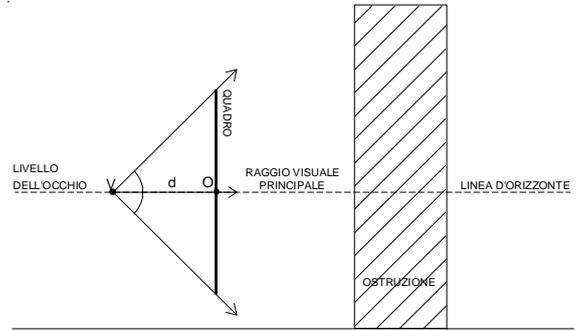


Fig.3. Vista laterale della prospettiva a quadro verticale

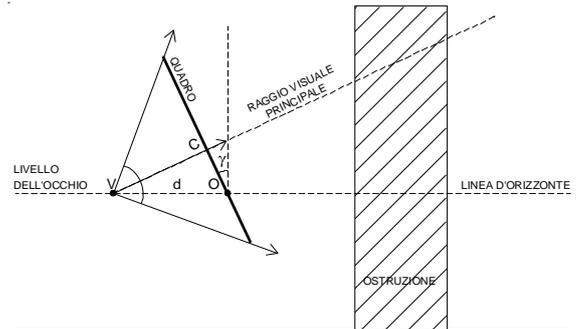


Fig.4. Vista laterale della prospettiva a quadro obliquo

### Prospettiva a quadro verticale

Se il quadro è verticale, la proiezione  $O$  del raggio visuale principale ricade sulla linea d'orizzonte e data l'analogia tra prospettiva e fotografia, quando la macchina fotografica è posta su un piano orizzontale, il punto  $O$  coincide con il centro  $C'$  dell'immagine fotografica individuato dall'intersezione delle sue diagonali. Una fotografia scattata in tale condizione, ha quindi una L.O. che divide in due parti uguali l'immagine fotografica. In questo caso, come mostrato in Fig.5, la posizione del sole può essere determinata utilizzando le seguenti equazioni:

$$\overline{OV} = d \quad \overline{OS'} = d \tan(\varphi) \quad \overline{SS'} = d \frac{\tan(\beta)}{\cos(\varphi)} \quad (7)$$

in cui  $d$  è la distanza tra l'osservatore e il quadro,  $\beta = \beta_s$  è l'altezza solare and  $\varphi$  è l'azimuth, cioè è la differenza tra l'azimuth solare  $\varphi_s$  e l'azimuth  $\varphi_{cam}$  del raggio visuale principale che è la direzione verso cui è puntata la macchina fotografica. Poiché il sole sorge e tramonta in corrispondenza della linea d'orizzonte, il percorso solare non sarà mai visibile nella metà più bassa della fotografia. Viceversa le zone più alte dell'ostacolo ombreggiante potrebbero non essere contenute completamente all'interno della fotografia. E' utile, quindi, inclinare la macchina fotografica verso l'alto al fine di riprendere la porzione più alta dell'ostacolo ed il cielo sovrastante.

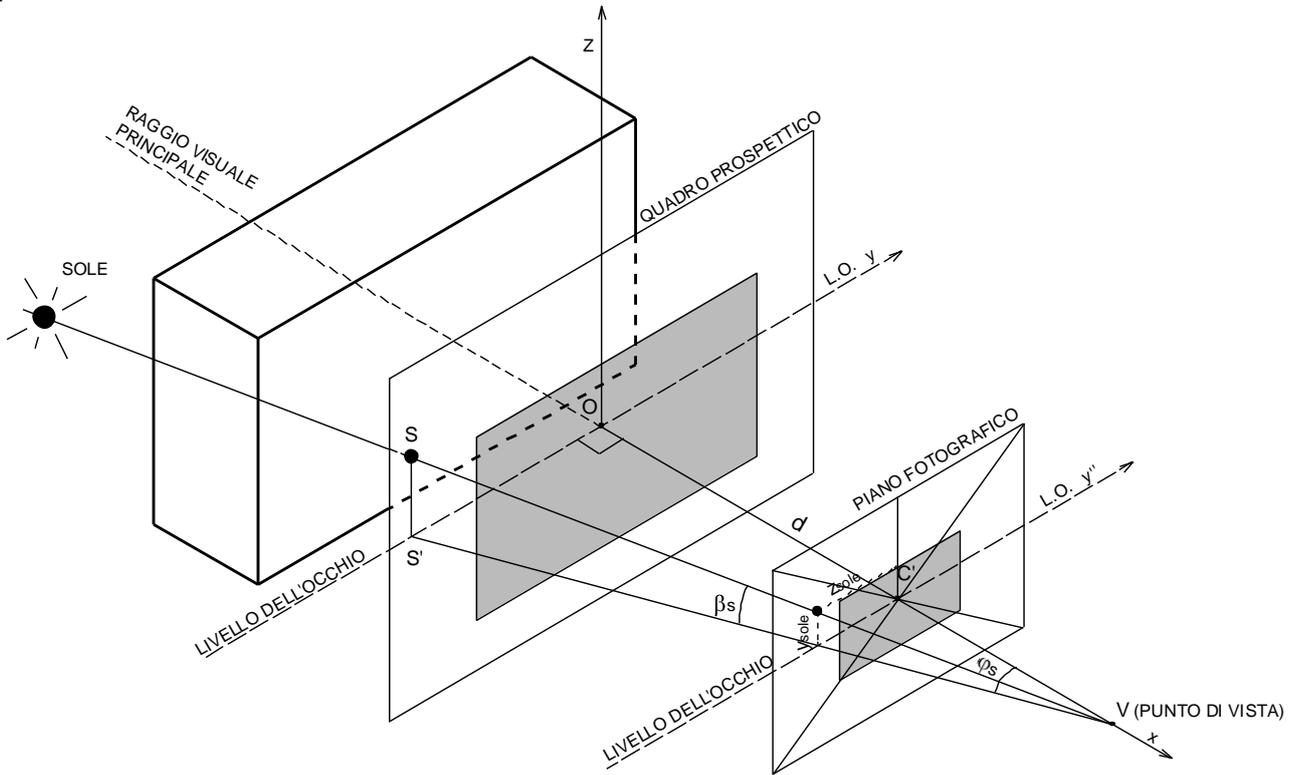


Fig.5. Vista della posizione del sole su un quadro prospettico verticale e sul piano fotografico.

### Prospettiva a quadro obliquo

Qualora il quadro prospettico non sia perpendicolare al piano di terra, ma inclinato di un angolo  $\gamma$ , la proiezione del raggio visuale principale ( $O$ ) non coincide più con la linea d'orizzonte. In questo caso, essendo la macchina fotografica inclinata verso l'alto, la L.O. si trova al di sotto del centro della fotografia e all'aumentare dell'angolo  $\gamma$ , scende verso il basso sino a fuoriuscire dall'immagine fotografica.

La posizione del sole sulla fotografia può essere determinata immaginando di ruotare il quadro prospettico verticale attorno alla sua linea d'orizzonte (Fig.6).

La posizione del sole è rappresentata dal punto  $T$  che corrisponde all'intersezione del raggio solare con il piano inclinato. Tale punto  $T$  può essere facilmente identificato mediante la geometria analitica nello spazio utilizzando un sistema di coordinate con l'origine posta sulla linea d'orizzonte. L'equazione generica di un piano nello spazio è:

$$mx + ny + pz + q = 0 \quad (8)$$

I coefficienti  $m$ ,  $n$ ,  $p$  and  $q$  possono essere determinati imponendo che i seguenti punti  $P_1$ ,  $P_2$  and  $P_3$ , di coordinate:

$$P_1 \equiv (0,0,0) \quad P_2 \equiv (0,1,0) \quad P_3 \equiv (\sin \gamma, 0, \cos \gamma) \quad (9)$$

appartengano al piano. Ne deriva che:

$$\frac{q}{p} = 0 \quad \frac{n}{p} = 0 \quad \frac{m}{p} = -\frac{\cos \gamma}{\sin \gamma} \quad (10)$$

e, conseguentemente, l'equazione del piano ruotato attorno all'asse  $y$  dell'angolo  $\gamma$  è:

$$\frac{x}{\tan \gamma} - z = 0 \quad (11)$$

Per determinare il punto  $T$ , è necessario scrivere l'equazione della retta che contiene i punti  $V$  e  $S$  che, nel sistema di coordinate di Fig.5, sono così rappresentati:

$$V \equiv [d, 0, 0] \quad S \equiv \left[ 0, d \tan(\varphi), d \frac{\tan(\beta)}{\cos(\varphi)} \right] \quad (12)$$

L'equazione della retta è descritta dalla seguente relazione:

$$\frac{x - x_V}{x_S - x_V} = \frac{y - y_V}{y_S - y_V} = \frac{z - z_V}{z_S - z_V} \quad (13)$$

in cui  $x_V, y_V, z_V$  e  $x_S, y_S, z_S$  sono le coordinate dei punti  $V$  and  $S$ , rispettivamente. L'Equazione (13) corrisponde alla seguente coppia di equazioni:

$$\begin{cases} x + \frac{1}{\tan(\varphi)} y - d = 0 \\ x + \frac{\cos(\varphi)}{\tan(\beta)} y - d = 0 \end{cases} \quad (14)$$

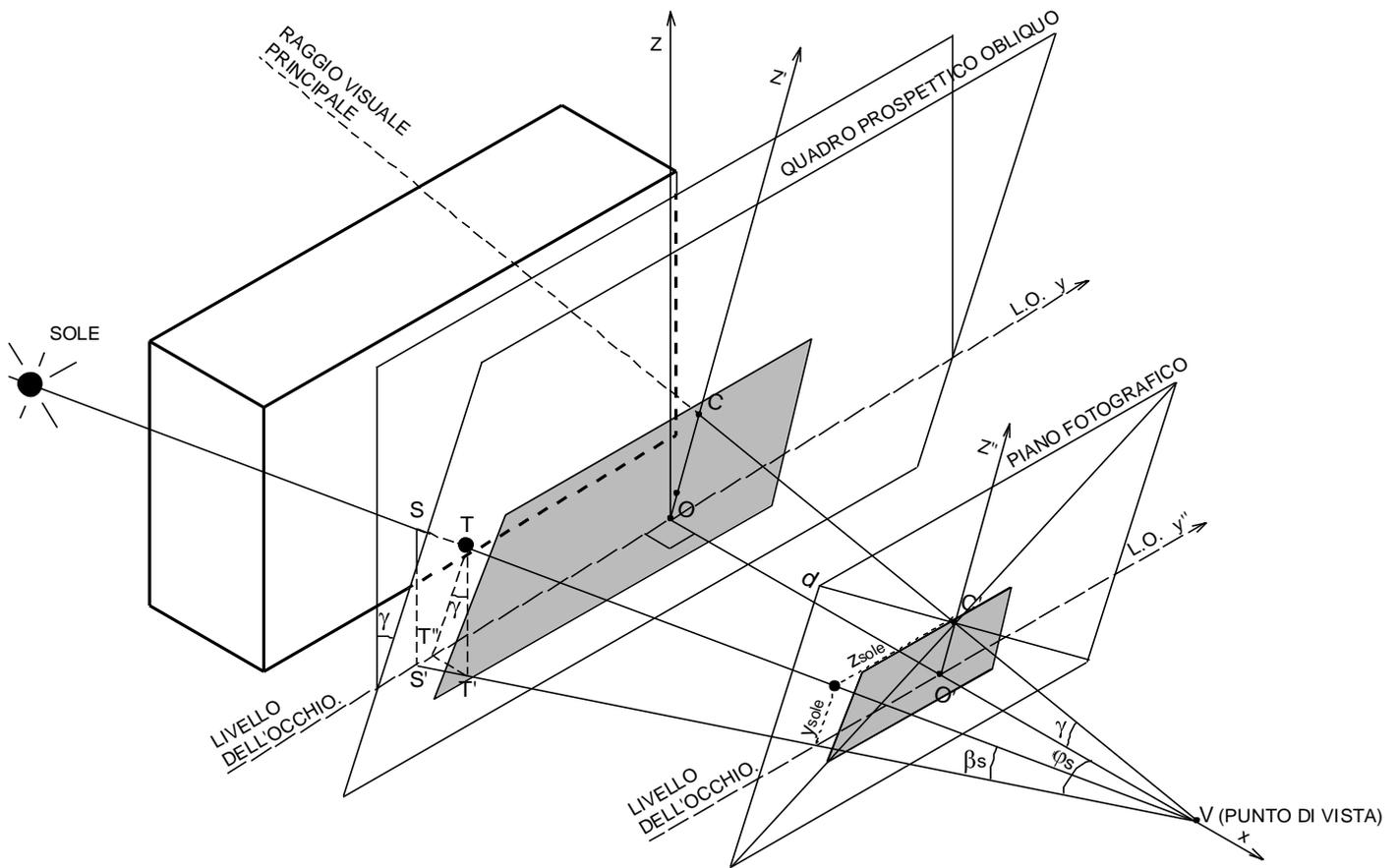


Fig. 6. Vista della posizione del sole su un quadro prospettico obliquo e sul piano fotografico.

Risolvendo il sistema formato dalle Eq.(11) e Eq.(14) è possibile determinare le coordinate del punto  $T$  :

$$\begin{aligned} x_T &= \frac{d \tan(\beta) \tan(\gamma)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \\ y_T &= \frac{d \sin(\varphi)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \\ z_T &= \frac{d \tan(\beta)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \end{aligned} \quad (15)$$

La posizione del punto  $T$  sul quadro prospettico obliquo è definita dalle seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} \overline{OT}'' &= \frac{d \tan(\beta) \tan(\gamma)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \\ \overline{TT}'' &= \frac{d \sin(\varphi)}{[\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)] \cos(\gamma)} \end{aligned} \quad (16)$$

Per calcolare le Eq. (16) è necessario conoscere l'angolo  $\gamma$  corrispondente all'inclinazione del raggio visuale principale, ovvero alla rotazione della macchina fotografica rispetto al piano orizzontale. Per determinare  $\gamma$ , una volta stampata la fotografia va individuato in essa il punto  $C'$ , come intersezione delle diagonali. Quindi deve essere rilevato l'angolo  $\gamma$  sotto cui è visto il punto dell'oggetto ostruente che, nella realtà, corrisponde al centro della fotografia. Talvolta può accadere che tale centro non corrisponda a un punto facilmente

riconoscibile dell'oggetto ostruente, ovvero ricada su una porzione della volta celeste. In tali casi la misurazione dell'angolo  $\gamma$  può risultare imprecisa o addirittura impossibile.

Per ovviare a quanto sopra evidenziato, l'angolo  $\gamma$  può essere determinato attraverso la misura degli angoli sotto cui sono visti i due punti  $M$  e  $N$  indicati nella Fig.7, che è una vista laterale semplificata della Fig.6.

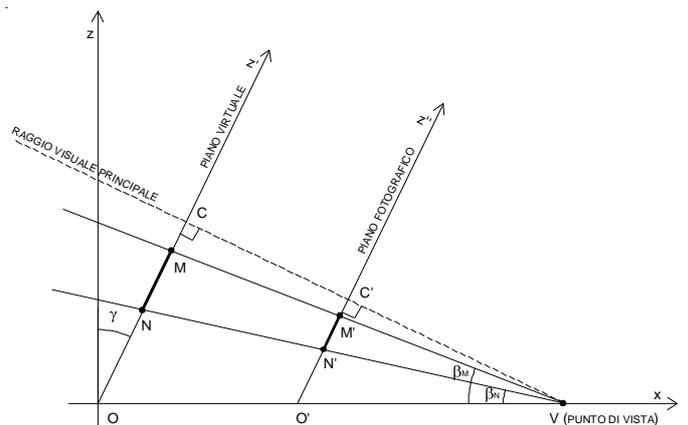


Fig.7. Vista laterale semplificata della figura 6

I punti  $M$  e  $N$  sono due generici punti posti lungo l'asse del piano prospettico, al di sotto del centro  $C$ ; ad essi corrispondono i punti  $M'$ ,  $N'$  sul quadro fotografico. Con riferimento ai triangoli  $O'CV$  e  $M'CV$  valgono le seguenti relazioni:

$$\overline{C'V} = \overline{O'V} \cos(\gamma) = d \cos(\gamma) \quad \overline{M'V} = \frac{\overline{C'V}}{\cos(\gamma - \beta_M)} \quad (17)$$

$$\overline{CM'} = \overline{M'V} \sin(\gamma - \beta_M) = d \cos(\gamma) \tan(\gamma - \beta_M)$$

ovviamente valide anche per il punto  $N'$ . Pertanto:

$$\frac{\overline{M'C'}}{\overline{N'C'}} = \frac{\tan(\gamma - \beta_M)}{\tan(\gamma - \beta_N)} = \frac{1 + \tan(\gamma) \tan(\beta_M)}{1 + \tan(\gamma) \tan(\beta_N)} = R \quad (18)$$

dove  $R$  misura il rapporto tra le lunghezze dei segmenti  $\overline{M'C'}$  e  $\overline{N'C'}$  misurati direttamente sulla fotografia. Con semplici passaggi è possibile ricavare dall'Eq. (18) il valore dell'angolo  $\gamma$ .

### Fattore di riduzione dell'immagine

Nella precedente Eq. (16) compare la distanza  $d$  misurata in orizzontale tra il punto di vista e la linea d'orizzonte. Se si modifica la distanza  $d$ , il quadro prospettico scivola parallelamente a sé stesso, mantenendo la medesima inclinazione. Poiché nella prospettiva centrale, proiettando l'oggetto da uno stesso punto di vista su piani a differente distanza da esso si ottengono immagini simili ma di dimensioni diverse, sembrerebbe indispensabile conoscere la misura di  $d$  per poter correttamente rappresentare la vista prospettica. In realtà non è  $d$  che è necessario conoscere, bensì l'ingrandimento o la riduzione dell'immagine rappresentata e ciò può essere calcolato senza dover ricorrere alla misurazione della distanza  $d$ .

Con riferimento alla Fig.7, la posizione del punto  $M$  può essere stimata usando le precedenti Eq. (15) imponendo le seguenti condizioni:

$$\overline{OV} = d \quad \beta_C = \gamma \quad \varphi_C = 0 \quad \varphi_M = 0 \quad (19)$$

in cui  $\varphi_C$  e  $\varphi_M$  sono, rispettivamente, gli angoli azimutali di  $C$  e  $M$ ,  $\beta_C$  è l'angolo zenitale del centro dell'immagine, che è uguale all'angolo di inclinazione del quadro. I calcoli producono i seguenti valori di coordinate:

$$x_C = \frac{d \tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma) + 1} \quad (20)$$

$$y_C = 0$$

$$z_C = \frac{d \tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma) + 1}$$

$$x_M = \frac{d \tan(\beta_M) \tan(\gamma)}{\tan(\beta_M) \tan(\gamma) + 1}$$

$$y_M = 0 \quad (21)$$

$$z_M = \frac{d \tan(\beta_M)}{\tan(\beta_M) \tan(\gamma) + 1}$$

in cui  $\beta_M$  è l'angolo zenitale del punto  $M$ . Utilizzando i valori delle loro coordinate è possibile valutare la distanza tra i punti  $C$  e  $M$ :

$$\overline{CM} = \sqrt{(x_C - x_M)^2 + (z_C - z_M)^2} = d \cdot \sqrt{D_x^2 + D_z^2} = d \cdot D \quad (22)$$

$$D_x = \frac{\tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma) + 1} - \frac{\tan(\beta_M) \tan(\gamma)}{\tan(\beta_M) \tan(\gamma) + 1} \quad (23)$$

$$D_z = \frac{\tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma) + 1} - \frac{\tan(\beta_M)}{\tan(\beta_M) \tan(\gamma) + 1} \quad (24)$$

Poiché i triangoli  $CVM$  e  $C'V'M'$  sono simili, è possibile definire un fattore di riduzione ( $RF$ ) che permette di scalare l'immagine dal piano prospettico al piano della fotografia. Tale fattore è dato da:

$$RF = \frac{\overline{C'M'}}{\overline{CM}} = \frac{\overline{C'M'}}{d \cdot D} \quad (25)$$

La quantità  $\overline{C'M'}$  rappresenta la distanza dal centro della fotografia di un generico punto  $M'$  posto sull'asse verticale che contiene il punto  $C'$ . Se  $\overline{C'M'}$  è misurato in millimetri e  $d$  in metri, il fattore di scalatura è espresso in mm/m perché  $D$  è adimensionale. Il fattore di riduzione permette di utilizzare i valori di  $\overline{OT''}$  e  $\overline{TT''}$  che indicano la posizione del sole sul quadro. Infatti, moltiplicando l'Eq. (16) per  $RF$  si può rappresentare la posizione del sole sulla fotografia utilizzando le seguenti coordinate  $y_{sole}$  e  $z_{sole}$ .

$$y_{sole} = \frac{\tan(\beta) \tan(\gamma)}{\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)} \cdot \frac{\overline{C'M'}}{D} \quad (26)$$

$$z_{sole} = \frac{\sin(\varphi)}{[\tan(\beta) \tan(\gamma) + \cos(\varphi)] \cos(\gamma)} \cdot \frac{\overline{C'M'}}{D}$$

Tali coordinate sono espresse in millimetri e sono indipendenti dal valore della distanza virtuale  $d$ . La quantità  $\overline{C'M'}$  cambia con le dimensioni della fotografia e questo consente di scalare correttamente la vista prospettica; la quantità  $D$  dipende dagli angoli  $\gamma$  e  $\beta_M$  dei punti dell'ostruzione corrispondenti ai punti  $C'$  e  $M'$  della fotografia.

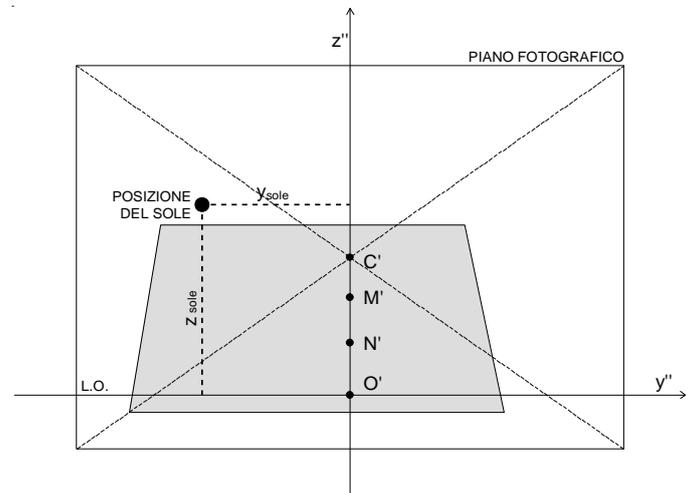


Fig. 8. Identificazione della posizione del sole nella fotografia

Nella Fig. 8 è mostrato come la posizione del sole nella fotografia sia identificata tramite le coordinate  $y_{sole}$  e  $z_{sole}$ . La coordinata  $z_{sole}$  è riferita all'asse  $y''$  che corrisponde alla linea d'orizzonte della vista prospettica.

Per potere tracciare la linea d'orizzonte sulla fotografia è necessario conoscere la posizione del punto  $O'$  che corrisponde al punto  $O$  nel quadro. Il punto  $O$  è l'origine del sistema di coordinate ortogonali della Fig. 6 e quindi la sua distanza dal punto  $C$  può essere calcolata utilizzando le coordinate descritte dall'Eq. (20):

$$\overline{CO} = d \sqrt{\left(\frac{\tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1}\right)^2 + \left(\frac{\tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1}\right)^2} \quad (27)$$

Conseguentemente, la distanza di  $C'$  da  $O'$  è calcolabile tramite il fattore  $RF$ :

$$\overline{C'O'} = \sqrt{\left(\frac{\tan^2(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1}\right)^2 + \left(\frac{\tan(\gamma)}{\tan^2(\gamma)+1}\right)^2} \cdot \frac{\overline{C'M'}}{D} \quad (28)$$

e indica a quanti millimetri al di sotto del centro della fotografia si trova la linea d'orizzonte, o asse  $y''$ .

#### 4. APPLICAZIONE DEL METODO FOTOGRAFICO E ANALISI DEI RISULTATI

Nonostante la complessità delle equazioni impiegate nella procedura, l'applicazione concreta del nuovo metodo è estremamente semplice e richiede poche facili misure per ogni fotografia scattata. In particolare per due punti, scelti arbitrariamente sull'asse passante per il centro della fotografia, sono richiesti i rispettivi angoli zenitali e azimutali, nonché la misura della loro distanza dal centro della foto.

Per la corretta applicazione del metodo è indispensabile che la fotografia sia scattata con una macchina posta su un piano orizzontale (è suggeribile a tal scopo l'utilizzo di una livella a bolla e di un treppiedi), perché la linea d'orizzonte nella fotografia deve risultare orizzontale così come nella vista prospettica reale. Successivamente, basta ruotare la macchina verso l'alto attorno all'asse orizzontale in modo da includere nella fotografia la maggiore porzione di ostruzione e la sovrastante volta celeste. Scattata la foto, vengono individuati il suo centro, come intersezione delle due diagonali, e due punti  $M'$  e  $N'$ , posti sull'asse verticale passante per il centro, che siano facilmente riscontrabili in situ sulle ostruzioni fotografate.

Si procede, quindi alla misurazione dei due angoli zenitali  $\beta_M$  e  $\beta_N$  e dell'angolo azimutale  $\varphi$ . Quest'ultimo angolo rappresenta l'orientamento della macchina rispetto all'asse sud e può essere misurato con una bussola o letto nella planimetria del sito. Poiché il termine  $D$  nel fattore di riduzione dipende dagli angoli  $\beta_M$  e  $\beta_N$ , l'accuratezza della loro misura influisce sulla correttezza della scalatura e sulla valutazione dell'angolo di inclinazione del quadro prospettico. Tuttavia, è stato verificato che anche misurando gli angoli con una precisione di  $\pm 0,5^\circ$ , il metodo garantisce risultati sufficientemente affidabili. Per tali misure anche un semplice clinometro è pertanto da considerarsi adeguato.

Una volta acquisiti i dati angolari si può precedere alla

misura delle due distanze  $\overline{C'M'}$  e  $\overline{C'N'}$  direttamente sulla fotografia per calcolare l'angolo di inclinazione del quadro ed il fattore di scala. Poi, tramite l'Eq. (28) si ricava la posizione di  $O'$  nella fotografia in modo da tracciare l'asse orizzontale del sistema di coordinate cartesiane. Infine, è possibile calcolare la posizione del sole con l'Eq. (26) utilizzando i valori di altezza solare  $\beta_s$  e azimuth solare  $\varphi_s$  calcolati con l'Eq. (1) e l'Eq. (2). Particolare attenzione deve essere posta rispetto all'angolo  $\varphi$  che, come già osservato, è la differenza tra l'azimuth solare  $\varphi_s$  e l'azimuth della macchina fotografica  $\varphi_{cam}$ .

Il metodo è stato applicato per calcolare la posizione del sole su immagini fotografiche dell'edificio del DREAM scattate utilizzando una macchina fotografica digitale con lunghezza focale di 50 mm. L'immagine appare fortemente deformata a causa dell'inclinazione della macchina e della vicinanza all'edificio. I dati di calcolo relativi all'immagine in Fig. 8 sono riassunti nella Tabella 1 mentre le coordinate angolari e rettangolari del sole alle differenti ore, valutate mediante una semplice routine implementata come macro VBA in Microsoft Excel, sono indicati nella Tabella 2.

Dai calcoli effettuati, la linea d'orizzonte risulta essere ad una distanza di 17,15 cm al disotto del centro della fotografia. Chiaramente tale valore non corrisponde a quello della fotografia riportata in Fig.8 che per esigenze di impaginazione, presenta dimensioni diverse dalla fotografia originaria. La Fig.8, in cui la posizione del sole calcolata è raffigurata in forma di piccoli cerchi, consente una immediata lettura delle ore in cui l'edificio ostruisce la radiazione solare diretta. A partire dalle 8.45 l'edificio non apporta alcun ombreggiamento sulla superficie considerata.

Al fine di effettuare un confronto con il metodo proposto da Quaschnig [21], è stato calcolato l'effetto dell'ostruzione individuando preliminarmente i singoli vertici del contorno dell'edificio. La necessità di descrivere con precisione la sagoma ha comportato la misura di 18 coppie di angoli azimutali e zenitali per la successiva sovrapposizione del poligono al diagramma del percorso solare così come raffigurato in Fig. 9.

Tabella 1. Dati di ingresso

DATI LOCALITA'		DATI FOTOGRAFIA	
Data	01.04.2010	Dimensioni [mm]	180x130
Città	Palermo	$\varphi_{cam}$	44.28°
Longitudine	13°21'0"E	$\beta_M$	32.20°
Latitudine	38°7'0"N	$\beta_N$	28.20°
LSM	+1	$C'M'$ [mm]	29,8
		$C'N'$ [mm]	44,2

Tabella 2. Coordinate della posizione del sole nella foto

Ora locale [ore]	Azimuth $\varphi_s$ [°]	Altezza $\beta_s$ [°]	$y_{sole}$ [mm]	$z_{sole}$ [mm]
9:00	-64.28	35.16	-5.82	15.80
9:15	-60.96	37.78	-4.64	16.55
9:30	-57.42	40.31	-3.51	17.27
9:45	-53.62	42.74	-2.40	17.99
10:00	-49.54	45.06	-1.30	18.71
10:15	-45.15	47.23	-0.21	19.43
10:30	-40.41	49.23	0.89	20.16
10:45	-35.30	51.04	2.00	20.91
11:00	-29.82	52.63	3.13	21.68
11:15	-23.97	53.97	4.30	22.48
11:30	-17.79	55.02	5.52	23.33

Il raffronto tra la Fig.8 e la Fig.9 conferma la maggiore semplicità e immediatezza di esecuzione del nuovo metodo fotografico. Per ulteriore conferma dell'attendibilità della procedura è stata effettuata una verifica sperimentale.

sole ad intervalli regolari di mezz'ora.

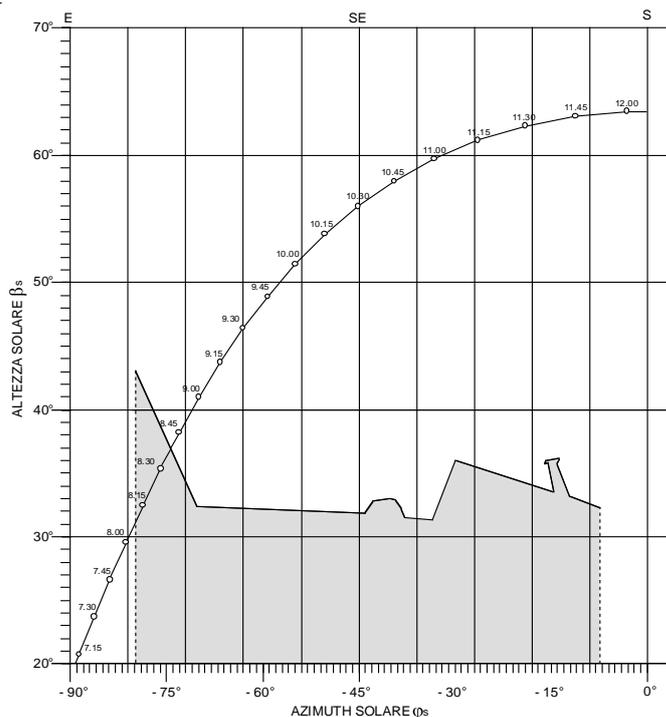


Fig. 9. Diagramma del percorso solare con la sagoma ostruente in coordinate cilindriche

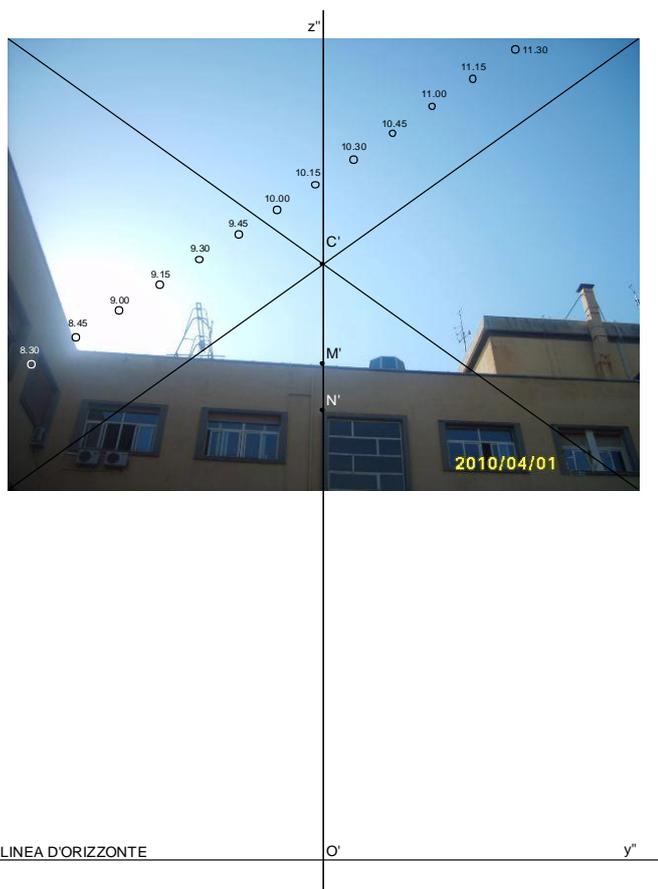


Fig. 8. Posizioni del sole calcolate alle varie ore



Fig. 10. Confronto tra la posizione del sole calcolata e quella fotografata

Sovrapponendo al percorso del sole calcolato le foto del disco solare, ottenute schermato opportunamente la macchina fotografica con delle lenti scure, si è ottenuta l'immagine di Fig. 10 in cui sono evidenziate le posizioni del

I maggiori scostamenti tra le posizioni fotografate e quelle calcolate sono riscontrabili in corrispondenza delle distanze più elevate dall'asse della fotografia. Tali differenze, riconducibili ad alcuni minuti di scarto nelle peggiori condizioni, sono imputabili ad un possibile movimento della macchina fotografica o alle distorsioni cui è soggetta la ripresa fotografica. D'altro canto per verificare la applicabilità pratica del metodo si sono volutamente impiegati degli strumenti fotografici comuni. Ovviamente migliori risultati potrebbero ottenersi con l'ausilio di strumenti fotografici professionali.

E' da rilevare che la distorsione dell'immagine dovuta alle lenti dipende dalla lunghezza focale e dall'apertura

dell'obiettivo della macchina fotografica. Gli effetti della distorsione dell'immagine si evidenziano a maggiore distanza dal centro di essa. Una lunghezza focale piccola, o un'apertura grande, producono un aumento della distorsione. Le fotografie scattate con obiettivi ad occhio di pesce, il cui angolo di apertura supera i 180°, costituiscono tipici esempi di immagine fotografica distorta. Le comuni macchine fotografiche digitali con una lunghezza focale di 50 mm apportano solo minime distorsioni, garantendo, quindi, l'agevole applicabilità del metodo, anche per la possibilità di interazioni con le procedure computerizzate.

## 5. CONCLUSIONI

E' stato proposto un nuovo metodo per valutare la presenza di radiazione solare diretta su un punto di una superficie di riferimento parzialmente ombreggiata. La procedura impiega l'immagine fotografica dell'ostruzione e la sovrapposizione del percorso solare. I calcoli, validi per un solo punto della superficie considerata, possono fornire contestualmente informazioni relative a tutto l'arco dell'anno. La semplicità esecutiva, riconducibile alla sola conoscenza di tre angoli, garantisce precisione dei risultati anche in rapporto alle regole proprie della fotografia.

Le prove sperimentali hanno confermato la validità dei dati ottenuti evidenziando scarti tra le posizioni del sole calcolate e quelle fotografate riconducibile ad alcuni minuti di differenza. Oltre all'efficacia dei risultati il metodo, confrontato con le procedure tradizionalmente impiegate, risulta particolarmente agile. Infatti, implementato in una macro Excel, è in grado di fornire istantaneamente e per qualunque località e giorno dell'anno di riferimento la posizione del sole sulla fotografia secondo gli intervalli di tempo desiderati.

## NOMENCLATURA

<i>AST</i>	ora solare apparente [ore]
<i>d</i>	distanza orizzontale tra punto di vista e quadro [m]
<i>ET</i>	equazione del tempo [min]
<i>H</i>	angolo orario [°]
<i>L</i>	latitudine [°]
<i>LON</i>	longitudine [°]
<i>LST</i>	ora locale [ore]
<i>LSM</i>	local standard time meridian [°]
<i>m, n</i>	coefficienti dell'equazione del piano
<i>n<sub>day</sub></i>	giorno dell'anno
<i>P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub></i>	punti sul piano obliquo
<i>p, q</i>	coefficienti dell'equazione del piano
<i>x<sub>C</sub>, y<sub>C</sub>, z<sub>C</sub></i>	coordinate del punto <i>C</i> [m]
<i>x<sub>M</sub>, y<sub>M</sub>, z<sub>M</sub></i>	coordinate del punto <i>M</i> [m]
<i>x<sub>S</sub>, y<sub>S</sub>, z<sub>S</sub></i>	coordinate della posizione del sole sul quadro verticale [m]
<i>x<sub>sole</sub>, y<sub>sole</sub>, z<sub>sole</sub></i>	coordinate della posizione del sole nella fotografia [mm]
<i>x<sub>T</sub>, y<sub>T</sub>, z<sub>T</sub></i>	coordinate della posizione del sole sul quadro obliquo [m]
<i>x<sub>V</sub>, y<sub>V</sub>, z<sub>V</sub></i>	coordinate del punto di vista [m]
<i>β</i>	angolo zenitale [°]
<i>β<sub>C</sub></i>	angolo zenitale del centro del quadro [°]
<i>β<sub>M</sub></i>	angolo zenitale del generico punto <i>M</i> [°]
<i>β<sub>S</sub></i>	altezza solare [°]

<i>γ</i>	angolo di inclinazione del quadro [°]
<i>δ</i>	declinazione solare [°]
<i>φ</i>	azimuth [°]
<i>φ<sub>S</sub></i>	azimuth solare [°]
<i>φ'</i>	azimuth solare relativo [°]
<i>φ<sub>C</sub></i>	angolo azimutale del centro del quadro [°]
<i>φ<sub>cam</sub></i>	azimuth del raggio visuale principale [°]
<i>φ<sub>M</sub></i>	azimuth del generico punto <i>M</i> [°]

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Karatepe, E., Hiyama, T., Boztepe, M., Çolak, M., 2008. Voltage based power compensation system for photovoltaic generation system under partially shaded insolation conditions. *Energy Conversion and Management* 49 (8), 2307-2316.
- [2] Gueymard, C.A., 2003a. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74 (5), 335-379.
- [3] Gueymard, C.A., 2003b. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: validation with high-quality measurements. *Solar Energy* 74 (5), 381-395.
- [4] Hay, J.E., Davies, J.A. 1980. Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface. In: Hay J.E., Won, T.K. (Eds), *Proc. Of First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, 59. Ministry of Supply and Services, Canada.
- [5] Klucher, T.M., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar Energy* 23 (2), 111-114.
- [6] Reindl, D.T., Beckmann, W.A., Duffie, J.A., 1990a. Diffuse fraction correlations. *Solar Energy* 45 (1), 1-7.
- [7] Reindl, D.T., Beckmann, W.A., Duffie, J.A., 1990b. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy* 45 (1), 9-17.
- [8] Loutzenhiser, P.G., Manz, H., Felsmann, C., Strachan, P.A., Frank, T., Maxwell, G.M., 2007. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. *Solar Energy* 81 (2), 254-267.
- [9] Torres, J.L., De Blas, M., Garcia, A., De Francisco, A., 2010. Comparative study of various models in estimating hourly diffuse solar irradiance. *Renewable Energy* 35 (6), 1325-1332.
- [10] *Ashrae Handbook – Fundamentals*, 2009. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA USA.
- [11] Carruthers, D.D., Roy, G.G., Uloth C.J., 1990. An evaluation of formulae for solar declination and the equation of time. *Research Report No 17*, School of Architecture, University of Western Australia.
- [12] Ecotect, <http://www.squ1.com>.
- [13] Radiance, <http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>.
- [14] TRNSYS, <http://www.trnsys.com/>.
- [15] Quaschnig, V., Hanitsch, R., 1998. Irradiance calculation on shaded surfaces. *Solar Energy* 62 (5), 369-375.
- [16] Grochowski, J., Fuge, U., Niehage, M., 1997. STASOL Ein Programm zur Simulation der Solarstrahlung unter Berücksichtigung von Teilabshattungen der Diffusend Direktstrahlung. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Symposium Photoltaische Solarenergie*, Staffelstein, 106-110.

- [17] Woyte, A., 1997. Charakterisierung von Abschattenden Objekten und ihr Einfluss auf den Energieertrag von Photovoltaik-Anlagen. Universität Hannover, Fachbereich Elektrotechnik and Institut für Solarenergieforschung, Hannover.
- [18] Caamaño, E., Lorenzo, E., 1997. On-site characterisation of grid-connected PV systems. Proceedings of the 14<sup>th</sup> EC PV Solar Energy Conference, Barcelona, 1536-1539.
- [19] Frei, R., Meier, C., Eichenberger, P., 2000. A fast, efficient and reliable way to determine the PV-shading horizon. Proceedings of the 16<sup>th</sup> EC PV Solar Energy Conference, Glasgow, 2678.
- [20] Skiba, M., Faller, F.R., Eikmeier, B., Ziolk, A., Unger, H., 2000. Skiameter shading analysis. Proceedings of the 16<sup>th</sup> EC PV Solar Energy Conference, Glasgow, 2402-2105.
- [21] Tomori, T. Otani, K., Sakuta, K., Kurokawa, K., 2000. On-site BIPV array shading evaluation tool using stereofisheye photographs. Proceedings of the 28<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, AK, 1599-1602.
- [22] Blewett, T., Horne, M., Hill, R., 1997. Heliodon prediction of shading on the building integrated photovoltaic systems. Proceedings of the 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, CA, 1393-1396.
- [23] Chaabene, M., Ben Ammar, M., 2008. Neuro-fuzzy dynamic model with Kalman filter to forecast irradiance and temperature for solar energy systems. *Renewable Energy* 33 (7), 1435-1443.
- [24] Chang, T.P., 2009. The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere. *Solar Energy* 83 (8), 1274-1284.
- [25] Drif, M., Perez, P.J., Aguilera, J., Aguilar, J.D., 2008. A new estimation method of irradiance on partially shaded PV generator in grid-connected photovoltaic systems. *Renewable Energy* 33 (9), 2048-2056.
- [26] Lopez, G., Batlles, F.J., Tovar-Pescador J., 2005. Selection of input parameters to model direct solar irradiance by using artificial neural networks. *Energy* 30 (9), 1675-1684.
- [27] Mellit, A., Eleuch, H., Benhanem, M., Elaoun, C. Massi Pavan, A., 2010. An adaptive model for predicting of global, direct and diffuse hourly solar irradiance. *Energy Conversion and Management* 51 (4), 771-782.
- [28] Muneer, T., 1997. *Solar Radiation and Daylight Models for the Energy Efficient Design of Buildings*. Architectural Press, Oxford.
- [29] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44 (5), 271-289.
- [30] Woyte, A., Nijs, J., Belmans, R., 2003. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field tests results. *Solar Energy* 74 (3), 217-233.

The new procedure uses the overlapping of the sun-path diagram on the photograph image that is transformed according to the rules of the perspective. By this way it is possible to draw directly on the picture the position of the sun for every day of the year and location, by using of an extremely limited number of data, which are easily available. The portions of the solar path intersected by the outline of the obstacles represented on the photographic image correspond to the periods of time during which the receiving point on the surface is shaded. Conversely, the remaining parts of the solar path show the presence of the direct radiation. The results of the comparison between the calculated and experimental data collected at the DREAM in Palermo are also presented.

## SUMMARY

A new method that permits to use the photographic image of the shading obstacles in order to calculating the reduced direct irradiation received by a surface is proposed. This method is similar to the procedure that uses the sun-path diagram in cylindrical coordinates and the polygon that corresponds to the outline of the surroundings.