

Unità TER-ENEAGE	Classificazione TER ECE07040	Distribuzione: Libera
Attività: Messa a punto di metodi per la caratterizzazione ottica di concentratori solari.		Parole chiave: Concentratori solari, Ottica senza immagine, Caratterizzazione ottica.

Titolo:

“Caratterizzazione ottica di concentratori solari con un metodo di illuminazione inversa”

Autori:

Antonio Parretta^{1,2}, Andrea Antonini^{2,3}, Emiliano Milan^{2,3}, Marco Stefancich^{3,4}¹ENEA Centro Ricerche “E. Clementel”, Via Martiri di M.te Sole 4, 40129 Bologna²Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara, Via Saragat 1, 44100 Ferrara³CPower SRL, Via Saragat 1, 44100 Ferrara⁴CNR, c/o Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara, Via Saragat 1, 44100 Ferrara**Sommario:**

E' presentato un nuovo metodo di caratterizzazione ottica indoor di concentratori solari, basato sull'illuminazione inversa del concentratore. In accordo con tale metodo, una sorgente di luce Lambertiana è prodotta in corrispondenza dell'apertura di uscita del concentratore, dove è generalmente collocato il ricevitore, e il fascio di luce emergente dall'apertura d'ingresso è analizzato in termini di radianza in funzione della direzione di uscita.

Il metodo è applicato sperimentalmente illuminando con una lampada o un laser un diffusore Lambertiano piano posto sull'apertura di uscita del concentratore. L'intensità luminosa prodotta su uno schermo posto a grande distanza dal concentratore è poi registrata da una videocamera ed elaborata al computer.

Il metodo può essere facilmente simulato con un codice di calcolo ottico. Sia le simulazioni ottiche che le misure sperimentali hanno dimostrato che, illuminando l'intera superficie del diffusore, il metodo produce una radianza direttamente correlata con l'efficienza ottica del concentratore.

Il metodo è stato applicato con successo a diversi tipi di concentratori del tipo “senza immagine” (non imaging), quali i concentratori della classe 3D-CPC (CPC: Compound Parabolic Concentrator).

Il vantaggio principale del metodo proposto sta nel fatto che tutte le informazioni relative all'efficienza ottica sono trasferite su una singola immagine. E' mostrato inoltre che il metodo “inverso” di illuminazione diventa un potente mezzo di investigazione delle proprietà ottiche del concentratore quando la sorgente lambertiana è modulata spazialmente all'interno dell'apertura di uscita.

4							
3							
2							
1							
0	Emissione	A. Parretta	27/11/07	V. Poriglia	/ /07	V. Poriglia	/ /07
Rev	Descrizione	Redazione	Data	Convalida	Data	Approvazione	Data

INDICE

1. INTRODUZIONE
2. IL METODO “DIRETTO” DI CARATTERIZZAZIONE DI UN CONCENTRATORE
3. PRINCIPI DEL METODO DI ILLUMINAZIONE INVERSA: “ILLUME”
4. TEORIA DEL METODO INVERSO
5. APPLICAZIONI DEL METODO “ILLUME”
6. CONCLUSIONI
7. RINGRAZIAMENTI

RIFERIMENTI

1. INTRODUZIONE

I sistemi a concentrazione basati sull'ottica senza immagine (nonimaging optics) [1-4] sono oggi molto studiati a causa di una serie di vantaggi, tra i quali i più importanti: la possibilità di raggiungere livelli molto elevati di concentrazione solare (con essi sono stati raggiunti i limiti termodinamici della concentrazione, dell'ordine di 100.000 soli); l'uso prevalente di superfici riflettenti e quindi l'assenza di aberrazioni; una curva di efficienza poco sensibile all'angolo di incidenza della luce e quindi una minore sensibilità agli errori di inseguimento solare (solar tracking). I sistemi a concentrazione del tipo "senza immagine" sono quindi divenuti oggi delle valide alternative ai più noti sistemi a concentrazione basati sull'uso di lenti di Fresnel o di specchi parabolici.

In questa relazione ci occuperemo prevalentemente della classe di concentratori "senza immagine" nota sinteticamente come CPC (Compound Parabolic Concentrator), applicata al solare fotovoltaico. Saranno analizzati alcuni tipi di concentratori 3D-CPC, ovvero tridimensionali o a fuoco puntiforme (point focus), derivati da quelli ideali per il fatto che la loro lunghezza è stata ridotta per motivi di praticità di costruzione e che la loro forma è stata leggermente modificata allo scopo di consentire un efficiente impacchettamento delle singole unità ottiche all'interno di un modulo fotovoltaico. A titolo di esempio, la Fig. 1 mostra una serie di curve di efficienza ottica di concentratori 3D-CPC confrontata con una serie di curve di efficienza di concentratori parabolici di rivoluzione [4].

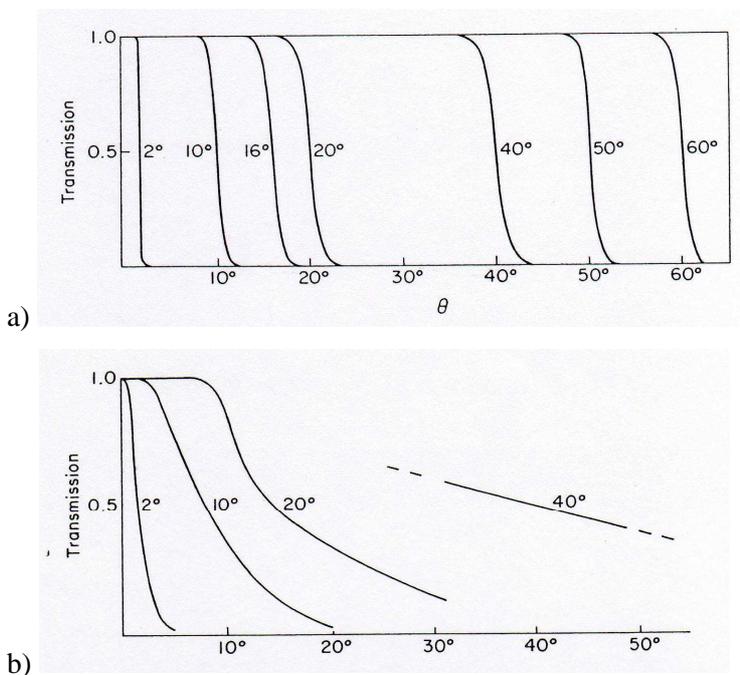


Figura 1. Curve d'efficienza (o trasmittanza) ottica di concentratori solari del tipo 3D-CPC (a) e del tipo parabolico classico (b).

A differenza di questi ultimi, i concentratori 3D-CPC mantengono quasi inalterate le loro proprietà di collezione della luce entro l'angolo corrispondente al 50% dell'efficienza, comunemente noto come angolo d'accettazione. Questo fatto comporta una minore sensibilità alla precisione con la quale il concentratore è orientato rispetto al sole, con il non trascurabile vantaggio di poter utilizzare sistemi d'inseguimento solare a più basso costo. Pur essendo l'angolo d'accettazione generalmente riferito al valore del 50% di efficienza, nelle applicazioni fotovoltaiche si preferisce definire un angolo d'accettazione corrispondente al 90% di efficienza [5]. Nel seguito, verranno riportati entrambi questi due valori per ogni concentratore studiato.

2. IL METODO “DIRETTO” DI CARATTERIZZAZIONE DI UN CONCENTRATORE

Tra i metodi che si possono adottare per misurare in laboratorio (indoor) l'efficienza ottica di un concentratore solare di limitate dimensioni, o prototipo di concentratore solare, quello più noto consiste nell'illuminare il concentratore con un fascio di luce collimato, con divergenza solare ($\pm 0.27^\circ$), di flusso noto, e nel misurare il flusso raccolto all'apertura di uscita del concentratore. Indicheremo, per semplicità, da qui in avanti questo metodo come “metodo diretto”. Lo schema sperimentale tipico del metodo diretto è mostrato in Fig. 2. La sorgente di luce (ls) illumina una sfera integratrice (is1) la quale produce, sulla sua apertura d'uscita (w) una luce diffusa con radianza costante. Per ottenere una luce con lo spettro della componente diretta del sole, si usa generalmente una lampada ad arco allo Xenon. In alternativa, si può selezionare una banda di lunghezze d'onda interponendo tra sorgente e sfera un filtro interferenziale (ft). La luce da (ls) è preferibilmente modulata dal chopper meccanico (ch), in maniera da avere misure con alta sensibilità e disaccoppiate dalla luce di fondo. Lo specchio parabolico (pm1), orientato off-axis rispetto a (w) e ad una distanza uguale alla lunghezza focale f dello specchio, raccoglie parte della luce emessa dalla sfera e la trasforma in un fascio quasi collimato. La divergenza angolare massima del fascio è regolata dall'apertura della finestra (w). Per avere una divergenza pari alla componente diretta della radiazione solare ($\sim 0.27^\circ$), è necessario mantenere intorno a 100 il rapporto f / D_w tra lunghezza focale e diametro di (w). Il fascio parallelo è poi filtrato spazialmente e diretto verso il concentratore solare (cpc). La luce in uscita da (cpc) è raccolta da una seconda sfera integratrice (is2) ed il flusso misurato dal lock-in amplifier (li) attraverso il fotorivelatore (pd). Orientando il concentratore (cpc) a diversi angoli δ rispetto all'asse del fascio, si può misurare l'andamento del flusso d'uscita e quindi l'efficienza ottica relativa del concentratore. Per ottenere l'efficienza ottica assoluta occorre misurare anche il flusso incidente sull'apertura d'ingresso del concentratore. Questo lo si ottiene modificando l'apparato di misura di Fig. 2(a), ovvero togliendo il concentratore e mettendo al suo posto un secondo specchio parabolico (pm2) a riflettività R_{pm} nota. Se indichiamo con $S_{cpc}(\delta)$ il segnale misurato con lo schema di Fig. 1(a) e con S_{ref} quello misurato con lo schema di Fig. 2(b), allora possiamo scrivere per l'efficienza ottica assoluta del concentratore:

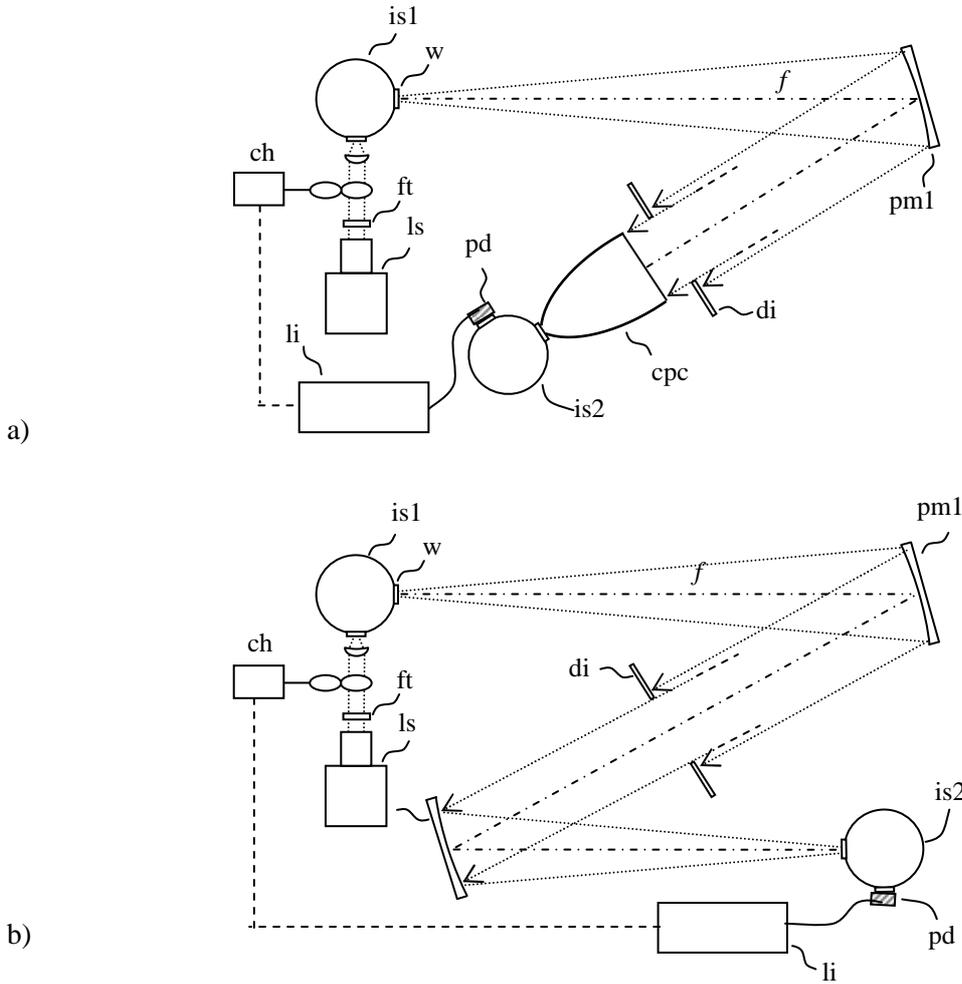


Figura 2. Schema sperimentale del metodo diretto. (a) Misura del flusso raccolto all'uscita del concentratore (cpc) per diversi valori dell'angolo d'incidenza. (b) Configurazione di riferimento per la misura del flusso raccolto all'ingresso del concentratore.

$$\eta(\delta) = S_{cpc}(\delta) \cdot \frac{R_{pm}}{S_{ref} \cdot \cos \delta} \quad (1)$$

dove R_{pm} è pesata sull'intervallo spettrale esaminato. La (1) è valida per concentratori a simmetria cilindrica. Nel caso generale, occorrerà considerare anche un angolo azimutale φ , per cui l'efficienza ottica diventa:

$$\eta(\delta, \varphi) = S_{cpc}(\delta, \varphi) \cdot \frac{R_{pm}}{S_{ref} \cdot \cos \delta} \quad (1')$$

L' Eq. (1') dovrà essere applicata, ad esempio, ai CPC con apertura d'ingresso quadrata, di cui si parlerà nel Cap. 5. La Fig. 3(a) mostra, a titolo d'esempio, alcune curve di efficienza ottica assoluta ottenute

simulando il metodo diretto per un concentratore CPC ideale [4], caratterizzato da un angolo di accettazione (axis tilt) $\delta_{acc} = 5^\circ$, un diametro dell'apertura di uscita $D_{out} = 1$ cm, e diversi valori di riflettività di parete: $R_w = 0.9, 0.95$ e 1.0 . Gli altri parametri dimensionali del CPC sono derivabili dai precedenti e sono: il diametro dell'apertura d'ingresso $D_{in} = 11.5$ cm e la lunghezza $L = 71,3$ cm. Le curve di efficienza ottica di Fig. 3(a) sono caratterizzate da un andamento quasi piatto per bassi valori di δ e da una caduta repentina in corrispondenza dell'angolo di accettazione (5°).

Un'analisi accurata dell'andamento delle curve di efficienza va fatta tenendo in considerazione due parametri di raytracing: il numero di raggi raccolti in uscita, $N_{out}(\delta)$, e il numero medio di riflessioni sulla parete interna del CPC. Il numero medio di riflessioni sulla parete, $\langle N(\delta) \rangle$, può essere ricavato confrontando tra loro due curve di efficienza, calcolate a due diversi valori di riflettività. Se Φ_{in} è il flusso, costante, del fascio collimato (onda piana) incidente all'angolo δ e $\Phi_{out}(R_w, \delta)$ è il flusso misurato all'uscita del CPC, la corrispondente efficienza ottica si può esprimere come (in caso di simmetria cilindrica):

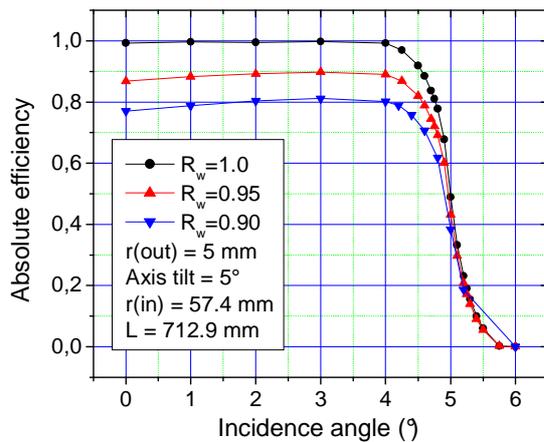
$$\eta(R_w, \delta) = \Phi_{out}(R_w, \delta) / \Phi_{in} = \Phi_{out}(1.0, \delta) \cdot R_w^{\langle N(\delta) \rangle} / \Phi_{in} \quad (2)$$

dalla quale la formula generale per il numero medio di riflessioni sulla parete diventa:

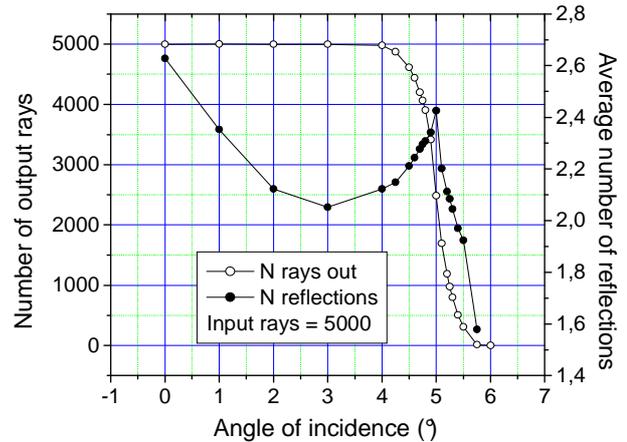
$$\langle N(\delta) \rangle = \ln \left[\frac{\eta(R_w, \delta)}{\eta(R_w', \delta)} \right] / \ln \left[\frac{R_w}{R_w'} \right] \quad (3)$$

Le quantità $N_{out}(\delta)$ e $\langle N(\delta) \rangle$, quest'ultima calcolata usando i dati di riflettività $R_w = 1.0$ e 0.95 , sono riportate in Fig. 3(b). Esse sono naturalmente indipendenti dalla scelta della coppia di valori R_w e R_w' . Nella prima parte della curva di $\langle N(\delta) \rangle$ ($0 < \delta < \delta_{acc}$), dove il numero di raggi in uscita è pressoché costante, l'efficienza è influenzata dal numero medio di riflessioni, ed infatti le curve di efficienza con $R_w < 1$ hanno un andamento a dosso opposto a quello a cunetta manifestato da $\langle N(\delta) \rangle$. In corrispondenza di δ_{acc} , $\langle N(\delta) \rangle$ mostra un massimo relativo e dopo diminuisce rapidamente. Per $\delta > \delta_{acc}$, nonostante la riduzione di $\langle N(\delta) \rangle$, l'efficienza mostra in tutti i casi una forte riduzione a causa della riduzione drastica della quantità $N_{out}(\delta)$, come mostrato nello stesso diagramma di Fig. 3(b). Le simulazioni delle curve di efficienza col metodo diretto sono state effettuate usando il software "TracePro® software for opto-mechanical modeling" [6] e hanno comportato una elaborazione per ogni valore di δ per un totale di circa venti elaborazioni per curva.

Prima di introdurre il metodo "inverso", è utile citare un secondo metodo "diretto" che, pur essendo meno preciso di quello precedente dal punto di vista della misura dell'efficienza globale del concentratore, tuttavia presenta dei vantaggi quando si tratta di investigare le proprietà ottiche locali del concentratore [7,8].



a)



b)

Figura 3. (a) Efficienza ottica, o trasmittanza, ottenuta per raytracing di un 3D-CPC ideale con 5° di angolo di accettazione, per tre valori di riflettività di parete. (b) Numero medio di riflessioni effettuate sulla parete del CPC dai raggi raccolti.

Secondo tale metodo, la sorgente di luce è un fascio laser non polarizzato, che viene movimentato sull'apertura d'ingresso del concentratore in modo da esplorare una matrice di punti dell'apertura stessa, producendo in tal modo una mappa d'intensità che è espressione dell'efficienza locale del concentratore. Diverse mappe possono essere costruite in funzione dell'angolo d'incidenza e, se necessario, dell'angolo di azimut. Una descrizione dettagliata di questo metodo applicato a un prototipo di concentratore 3D-CPC dimezzato e squadrato si trova nella Tesi di Laurea di V. Franceschini [9].

3. PRINCIPI DEL METODO DI ILLUMINAZIONE INVERSA: "ILLUME"

La Fig. 4 mostra lo schema di principio del metodo inverso, denominato ILLUME (Inverse Illumination Method). Come è stato fatto per il metodo diretto, anche il metodo ILLUME verrà illustrato applicandolo a concentratori solari di tipo "senza immagine" (nonimaging), genericamente denominati CPC, che sono attualmente in studio presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara. L'apertura di uscita (oa) del CPC è chiusa con un riflettore Lambertiano ad alta riflettività (tipicamente 98–99%), chiamato anche "target". Un fascio collimato di luce (ib), allineato con l'asse ottico del CPC, è predisposto in modo da illuminare l'intera superficie del target affacciata all'interno del concentratore. La luce incidente è retrodiffusa verso tutte le direzioni, subisce una serie di riflessioni all'interno del CPC ed esce quindi all'esterno dalla parte dell'apertura d'ingresso. Il fascio in uscita (ob) è poi proiettato su uno schermo piano (sc) per l'osservazione visiva e per la registrazione dell'immagine prodotta per mezzo di una camera digitale o di una CCD.

Poiché, per definizione di diffusore Lambertiano, i raggi sono emessi verso destra dal diffusore in tutte le possibili direzioni a radianza costante, ne deduciamo che l'insieme di questi raggi (ob) deve corrispondere all'insieme di tutti quei raggi che, diretti in senso opposto, sarebbero in grado di raggiungere il target, e quindi che sono potenzialmente collezionabili durante l'illuminazione col metodo diretto. Il metodo ILLUME, perciò, fornisce un insieme di raggi (ob) contenenti tutte le informazioni relative alle proprietà di collezione della luce da parte del CPC, compresa l'informazione dell'angolo di accettazione.

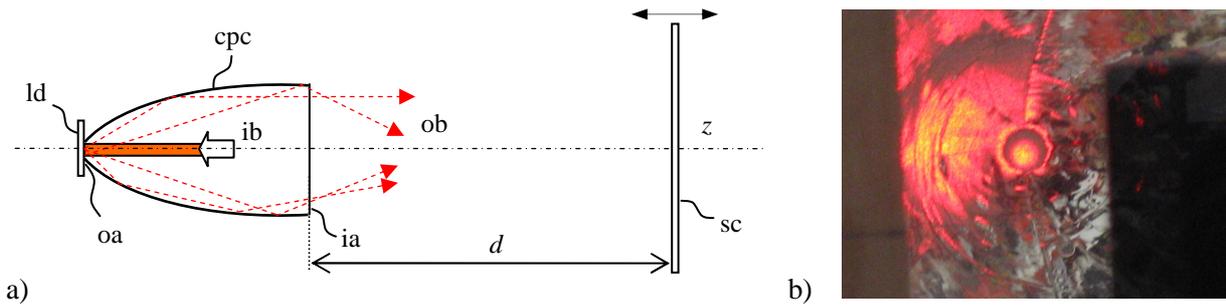


Figura 4. (a) Schema di principio del metodo di illuminazione inversa (ILLUME). (b) Foto dell'interno di un CPC che mostra il diffusore illuminato sull'apertura di uscita.

La dimostrazione analitica esatta di quanto affermato verrà data nel prossimo capitolo. In questo ci limitiamo a fornire una prima prova di validità del metodo fatta attraverso simulazioni con TracePro®, che dimostrano che il metodo diretto e il metodo inverso sono equivalenti, in quanto portano allo stesso risultato, ovvero alla curva di efficienza ottica del concentratore. Il vantaggio del metodo inverso è di richiedere una sola elaborazione, ovvero quella dell'intensità luminosa prodotta sullo schermo (sc).

Per una prima dimostrazione di quanto sopra, abbiamo modellato un CPC ideale equivalente a quello illustrato nell'Introduzione, e con $R_w = 1.0$, secondo il metodo ILLUME illustrato schematicamente in Fig. 4(a). Ponendo uno schermo piano (sc) molto lontano dal CPC, ovvero ad una distanza molto maggiore delle dimensioni lineari dell'apertura d'ingresso, abbiamo ottenuto un'immagine corrispondente alla distribuzione dell'irradianza del fascio (ob) sullo schermo, come si vede in Fig. 5(a). Questa distribuzione è naturalmente simmetrica rispetto all'asse z, così come il CPC che abbiamo considerato. Sempre in Fig. 5(a) è mostrato il profilo medio dell'irradianza lungo le direzioni x/y, ricavato dalla mappa corrispondente. Questo profilo è stato poi normalizzato all'incidenza di 0° e trasformato nella radianza relativa in funzione dell'angolo d'incidenza sullo schermo secondo la procedura che segue. Se $E(d, x)$ è l'irradianza in W/cm^2 prodotta sul punto P posto a distanza x dall'asse z sullo schermo (vedi Fig. 4(a)), il quale a sua volta è posto a distanza d dal CPC (supposto a simmetria cilindrica), allora la radianza lungo la direzione δ può essere espressa come:

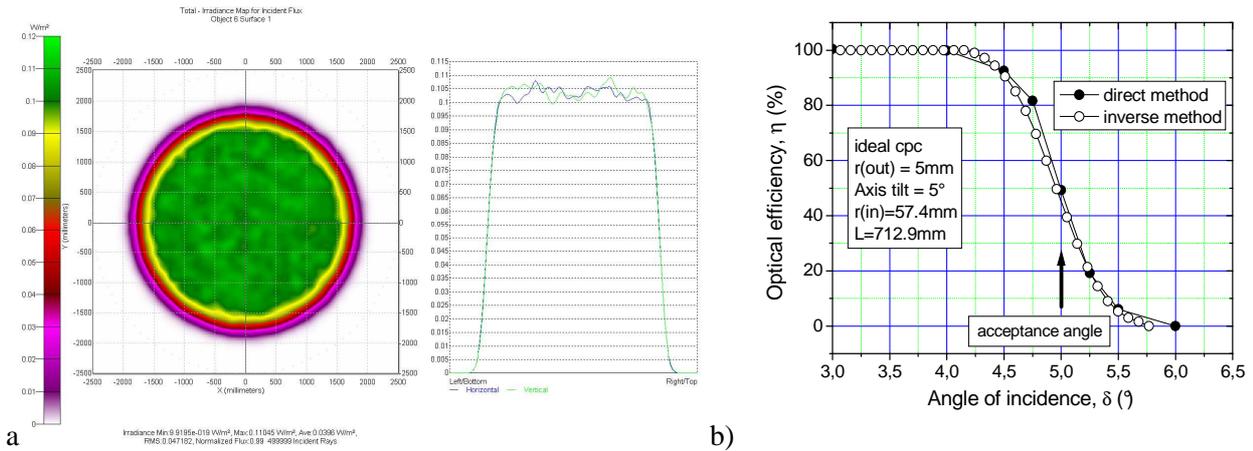


Figura 5. (a) Mappa di irradianza simulata, ottenuta su uno schermo circolare di 440-cm di diametro, distante 2000 cm dal CPC (sinistra), e profilo x/y medio della stessa mappa (destra). (b) Efficienza ottica assoluta (equivalente a quella relativa) del CPC ideale in funzione dell'angolo d'incidenza, calcolata seguendo sia il metodo diretto che inverso d'illuminazione.

$$L(\delta) = L(d, x) = E(d, x) \cdot \frac{r^2}{\cos^2 \delta} = E(d, x) \cdot \frac{d^2}{\cos^4 \delta} = E(d, x) \cdot \frac{d^2}{\cos^4 \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{x}{d} \right) \right]} \quad (4)$$

Il profilo di $E(d, x)$, normalizzato per $\delta = 0$, $E(d, 0) = L(0) / d^2$, fornisce la radianza relativa $L_{rel}(\delta)$:

$$L_{rel}(\delta) = \frac{L(\delta)}{L(0)} = \frac{L(d, x)}{L(0)} = \frac{E(d, x)}{E(d, 0)} \cdot \frac{1}{\cos^4 \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{x}{d} \right) \right]} = E_{rel}(d, x) \cdot \frac{1}{\cos^4 \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{x}{d} \right) \right]} \quad (5)$$

La radianza relativa $L_{rel}(\delta)$, come dimostreremo in dettaglio nel prossimo capitolo, corrisponde all'efficienza relativa del concentratore $\eta_{rel}(\delta) = \eta(\delta) / \eta(0)$. Nel caso specifico, essendo $\eta(0) = 1.0$, l'efficienza relativa corrisponde a quella assoluta. Il profilo di $L_{rel}(\delta)$, e quindi di $\eta_{rel}(\delta)$, ottenuto col metodo ILLUME è sovrapposto in Fig. 5(b) a quello ottenuto col metodo diretto. Il confronto mostra che i due metodi sono equivalenti e che da essi si ottiene la stessa curva di efficienza e quindi anche lo stesso angolo di accettazione. Con ILLUME misuriamo, infatti, $\delta_{acc} = 5.0 \pm 0.1^\circ$. Questo risultato rilevante dimostra la possibilità di caratterizzare concentratori di tipo “senza immagine” per mezzo di un semplice schema di simulazione e attraverso una singola elaborazione. In linea di principio il metodo ILLUME può essere applicato anche ad altri concentratori, sia a lente che a specchio, del tipo “con immagine” o “image

forming”, come verrà dimostrato nel prossimo capitolo. ILLUME può essere quindi considerato come un metodo universale per la caratterizzazione di un sistema ottico.

Il metodo ILLUME può essere applicato, oltre che attraverso una simulazione ottica, anche attraverso una misura sperimentale di laboratorio, come mostrato in Fig. 6. Si può usare un laser (la) come sorgente di luce per illuminare il target (ld). Per illuminare l’intera superficie del target, si usa un espansore di fascio (be), regolato spazialmente dal diaframma (di). Lo schermo (sc) viene poi movimentato di fronte al concentratore in modo da intercettare la luce retrodiffusa da quest’ultimo. Per ottenere la curva di efficienza, è necessario mantenere lo schermo, forato, a grande distanza dal CPC. L’immagine prodotta sullo schermo può essere poi registrata con una CCD orientata in posizione inclinata. In questo caso, la mappa d’irradianza dovrà essere elaborata per correggere gli effetti di prospettiva e per tener conto delle proprietà diffuse non ideali dello schermo (sc). A tal proposito può essere utile utilizzare un codice specifico da noi elaborato allo scopo di caratterizzare fasci di luce concentrata [10].

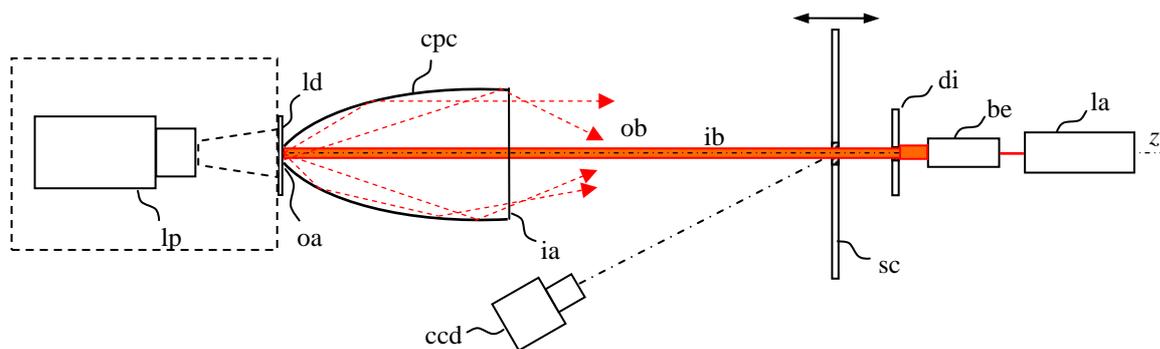


Figura 6. Setup sperimentale relativo al metodo inverso ILLUME. La lampada (lp) nel box può essere usata al posto del laser (la) se è preferita l’illuminazione sulla parte posteriore. In questo caso, la CCD può essere allineata con l’asse z sulla parte destra dello schermo.

In uno schema alternativo, impiegando un diffusore Lambertiano semitrasparente, il fascio di luce può essere applicato dalla parte posteriore del CPC, con il vantaggio che, data la libertà di spazio presente con questa configurazione, si può impiegare una lampada che produca un fascio d’intensità uniforme, non necessariamente collimato. In questo caso lo schermo non dovrà essere forato e potrà muoversi liberamente di fronte al CPC.

4. TEORIA DEL METODO INVERSO

4.1 Teoria di base

La Fig. 7 mostra schematicamente un concentratore solare (cs) illuminato in modo diretto da un fascio collimato uniforme, ovvero da un'onda piana incidente ad un angolo δ rispetto all'asse ottico z .

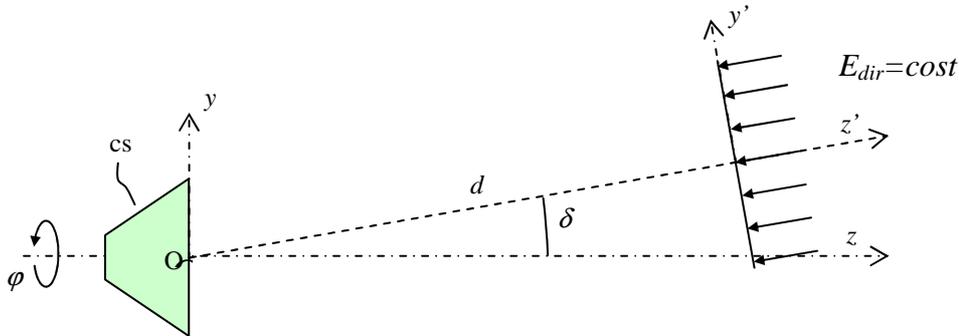


Figura 7. Rappresentazione schematica di un concentratore solare (cs) illuminato da un'onda piana.

L'onda piana è caratterizzata da un'irradianza costante E_{dir} sul piano x'/y' del fronte d'onda. Se $\Phi_{in}(\delta)$ è il flusso incidente sul concentratore e $\Phi_{out}(\delta, \varphi)$ è il flusso in uscita dal concentratore, allora definiamo l'efficienza ottica come:

$$\eta(\delta, \varphi) = \Phi_{out}(\delta, \varphi) / \Phi_{in}(\delta) = \Phi_{out}(\delta, \varphi) / E_{dir} \cdot A_{in} \cdot \cos \delta \quad (6)$$

dove A_{in} è l'area dell'apertura d'ingresso di (cs). Nell'ipotesi in cui non vi siano perdite ottiche nel concentratore, possiamo raffigurare l'efficienza ottica in maniera molto semplice proiettando l'apertura d'ingresso lungo la direzione (δ, φ) e individuando, sulla superficie proiettata, due diverse regioni, una attraversata dai raggi raccolti e una attraversata dai raggi respinti.

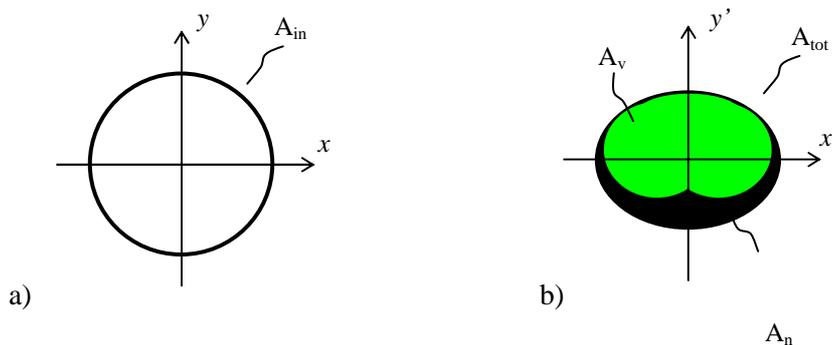


Figura 8. In (a) è rappresentata l'apertura d'ingresso del concentratore, in (b) la sua proiezione lungo la direzione (δ, φ) .

Per semplicità, coloriamo diversamente le due regioni, verde e con area A_v quella dei raggi raccolti e nera con area A_n quella dei raggi respinti. Possiamo allora riscrivere l'espressione dell'efficienza ottica come:

$$\eta(\delta, \varphi) = A_v(\delta, \varphi) / (A_n(\delta, \varphi) + A_v(\delta, \varphi)) = A_v(\delta, \varphi) / A_{tot}(\delta) = A_v(\delta, \varphi) / A_m \cdot \cos \delta \quad (7)$$

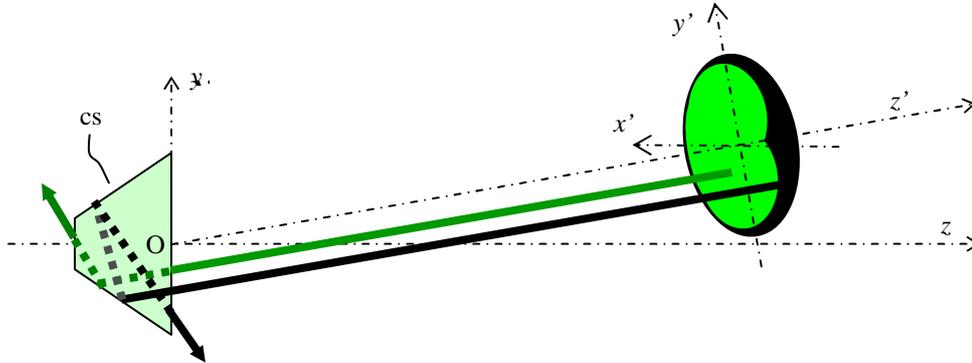


Figura 9. I raggi passanti per la regione verde vengono raccolti, quelli passanti per la regione nera vengono respinti. La proiezione dell'area di ingresso del (cs) sul piano x'/y' è mostrata in prospettiva per semplicità.

Se ora immaginiamo di proiettare dei raggi elementari dalle diverse zone della superficie proiettata, avremo due possibilità: i raggi saranno raccolti o respinti a seconda della regione di provenienza (vedi Fig. 9). Al contrario, se immaginiamo di invertire il senso dei raggi, troveremo che, qualunque raggio emesso dal ricevitore verso destra verrà raccolto sull'apertura d'ingresso di (cs). Non solo, ma l'insieme dei raggi emessi dal ricevitore verso destra costituisce l'insieme di tutti quei raggi che, in direzione opposta, ovvero secondo il metodo diretto, sarebbero raccolti dal concentratore. Il flusso emesso verso destra nella direzione (δ, φ) dovrà quindi necessariamente corrispondere al flusso raccolto verso sinistra nella stessa direzione. Questo equivale a dire che l'intensità radiante emessa verso destra nella direzione (δ, φ) è proporzionale all'efficienza ottica misurata col metodo diretto lungo la stessa direzione.

Vediamo ora come sarebbero distribuiti spazialmente e angularmente i raggi sul ricevitore qualora irradiassimo il concentratore con un insieme di onde piane, di cui è riportato un esempio in Fig. 7, caratterizzate dalla stessa intensità E_{dir} e distribuite in maniera continua su tutto l'emisfero frontale. Se immaginiamo di invertire il percorso dei raggi e di considerare un qualunque punto P sul ricevitore e una qualsiasi direzione di emissione a partire da esso, dobbiamo convenire che la radianza associata a questa emissione deve essere costante per tutti i punti e per tutte le direzioni in considerazione del fatto che l'emissione deve produrre, sull'emisfero frontale del concentratore, la stessa intensità radiante qualsiasi sia la direzione di uscita del flusso considerato. In maniera equivalente possiamo dire che il flusso emesso da qualsiasi punto P del ricevitore, entro l'angolo solido unitario e per una sezione unitaria della proiezione della superficie emettitrice nella direzione di emissione, deve essere costante. Queste caratteristiche corrispondono a una sorgente con emissione uniforme e radianza costante, ovvero a una sorgente di tipo Lambertiano.

Questo concetto può essere meglio illustrato prendendo in considerazione un fascio elementare di luce di sezione ortogonale dS e flusso $d\Phi$ incidente in direzione δ_{in} all'ingresso del concentratore secondo il metodo diretto, ovvero da destra verso sinistra (vedi Fig. 10a). Se il fascio elementare è raccolto in uscita senza perdite (per assorbimento o diffusione) in direzione δ_{out} , allora avremo in uscita (oa) lo stesso flusso elementare $d\Phi$ proiettato lungo la direzione δ_{out} attraverso la sezione ortogonale dS costante. Entro l'angolo solido unitario avremmo quindi un flusso per unità di area proiettata, ovvero una radianza, pari a $d\Phi / dS$. Essendo $d\Phi$ e dS costanti per ogni fascio elementare raccolto, possiamo concludere che l'insieme dei raggi raccolti sull'apertura d'uscita (oa) del concentratore costituisce un flusso uniforme a radianza costante, caratteristico di una sorgente Lambertiana. Se ora immaginiamo di invertire il percorso dei fasci elementari (vedi Fig. 10b), l'insieme di essi costituirà, in corrispondenza dell'apertura d'uscita (oa) e da sinistra verso destra, una sorgente uniforme a radianza costante, ovvero ancora una sorgente Lambertiana.

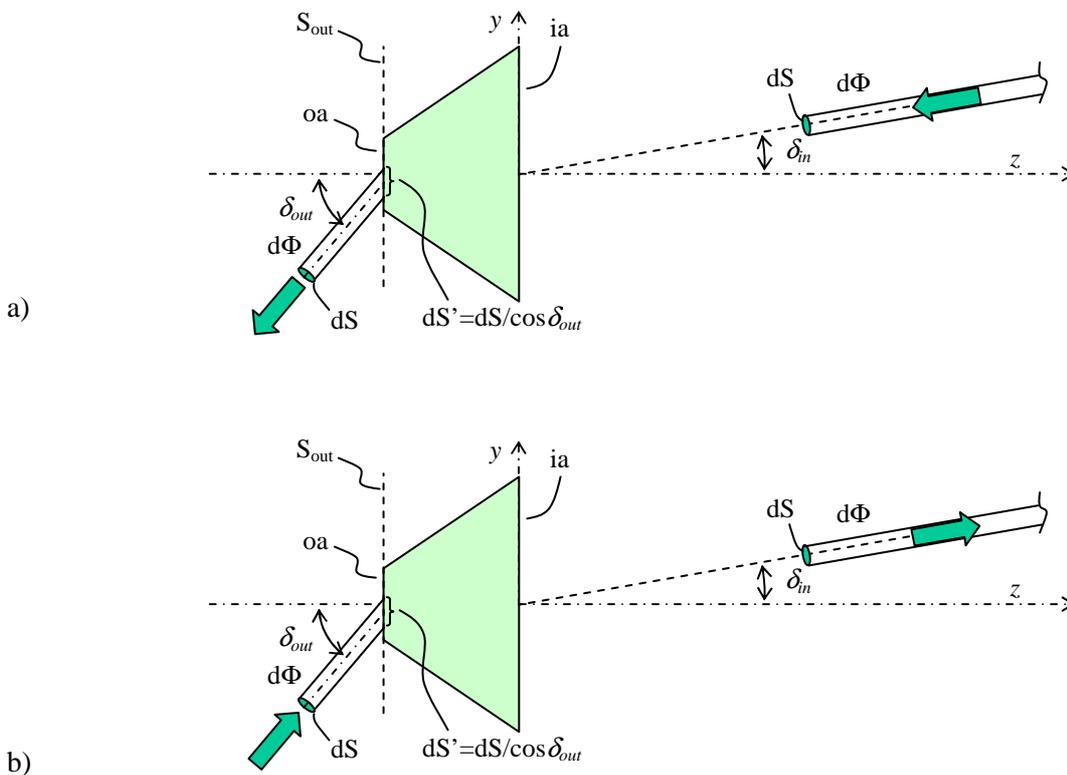


Figura 10. Schematizzazione dell'irraggiamento del concentratore con un fascio elementare di luce. (a) Metodo diretto; (b) metodo inverso.

Ancora dalla Fig. 10 notiamo che il fascio elementare di flusso $d\Phi$ attraversa l'apertura (oa) producendo un'irradianza (flusso per unità di superficie) pari a:

$$d\Phi/dS' = (d\Phi/dS) \cdot \cos \delta_{out} = \text{cost} \cdot \cos \delta_{out} \quad (8)$$

Possiamo esprimere meglio quanto detto sinora a proposito della sorgente lambertiana considerando di nuovo le Figg. 10(a) e (b). Il fascio elementare di flusso $d\Phi$ e sezione dS attraversa il piano trasversale S_{out} dell'apertura d'uscita ad un angolo generico δ_{out} e intercetta tale superficie su un'area $dS' = dS/\cos\delta_{out}$. Il flusso emesso dall'unità di superficie di S_{out} , verso sinistra nel metodo diretto o verso destra nel metodo inverso, in direzione δ_{out} e per angolo solido unitario, è pari allora a:

$$I_{uni}(\delta_{out}) = (d\Phi/dS) \cdot \cos\delta_{out} = const \cdot \cos\delta_{out} \quad (9)$$

Esso corrisponde all'intensità radiante, espressa in W/sr, della sorgente di radiazione relativa all'unità di superficie di S_{out} . La corrispondente radianza $L_{uni}(\delta_{out})$ si ottiene dividendo $I_{uni}(\delta_{out})$ per la proiezione dell'area unitaria verso la direzione δ_{out} , ovvero per $\cos(\delta_{out})$:

$$L_{uni}(\delta_{out}) = I_{uni}(\delta_{out}) / \cos\delta_{out} = d\Phi / dS = const \quad (10)$$

Le Eq. (9) e (10) mostrano quindi con chiarezza che l'unità di superficie di S_{out} dell'apertura di uscita del concentratore si comporta, sia in direzione diretta che inversa, come una sorgente per la quale l'intensità radiante varia come il $\cos(\delta_{out})$ e di conseguenza la radianza è costante. Estendendo questo concetto a tutta la superficie dell'apertura di uscita del concentratore, abbiamo per l'intensità radiante:

$$I(\delta_{out}) = (d\Phi/dS) \cdot \cos\delta_{out} = const \cdot \cos\delta_{out} \quad (9')$$

e per la radianza:

$$L(\delta_{out}) = I(\delta_{out}) / \cos\delta_{out} = d\Phi / dS = const \quad (10')$$

Questi sono due modi equivalenti per esprimere il carattere di Lambertianità di una sorgente piana.

Consideriamo ora il caso generale in cui vi siano perdite ottiche nel concentratore. Consideriamo ancora un fascetto elementare di luce incidente sull'apertura d'ingresso (ia) lungo la direzione (δ, φ) e di flusso $d\Phi$. Il fascetto uscirà dal concentratore attenuato, con flusso $d\Phi^{dir}$ dato da:

$$d\Phi^{dir}(\delta, \varphi) = \eta(\delta, \varphi) \cdot d\Phi \quad (9)$$

Questa situazione corrisponde al metodo diretto. Il fascetto, durante il passaggio nel concentratore, avrà subito, nel caso più generale, riflessioni e rifrazioni alle interfacce presenti. Immaginiamo ora di invertire il percorso dei raggi. Assegniamo al fascetto elementare emesso dall'apertura di uscita (oa) verso destra ancora un flusso elementare $d\Phi$. Essendo che le leggi della riflessione e della rifrazione non dipendono dal senso di percorrenza del cammino ottico per una radiazione non polarizzata, il fascetto con flusso $d\Phi$ subirà, nel percorso inverso, la stessa attenuazione che nel percorso diretto e uscirà verso destra dall'apertura d'ingresso (ia) con un flusso:

$$d\Phi^{inv}(\delta, \varphi) = \eta(\delta, \varphi) \cdot d\Phi \quad (10)$$

Ne consegue che la radianza emessa in senso inverso nella direzione (δ, φ) sarà proporzionale all'efficienza ottica del concentratore:

$$L^{inv}(\delta, \varphi) = cost \cdot \eta(\delta, \varphi) \quad (11)$$

e ancora avremo per la radianza inversa relativa:

$$L_{rel}^{inv}(\delta, \varphi) = \frac{L^{inv}(\delta, \varphi)}{L^{inv}(0)} = \eta_{rel}(\delta, \varphi) = \frac{\eta(\delta, \varphi)}{\eta(0)} \quad (12)$$

Se poniamo allora di fronte al concentratore e a grande distanza d da esso, con d molto maggiore delle dimensioni lineari dell'apertura d'ingresso (ia), uno schermo (sc) per la raccolta della luce proiettata, misureremo sullo schermo, nel punto P a distanza \bar{a} dall'origine O, un'irradianza $E^{inv}(d, \bar{a})$ (vedi Fig. 11). Da essa ricaviamo la radianza assoluta inversa:

$$L^{inv}(\delta, \varphi) = L^{inv}(d, \bar{a}) = E^{inv}(d, \bar{a}) \cdot \frac{r^2}{\cos^2 \delta} = E^{inv}(d, \bar{a}) \cdot \frac{d^2}{\cos^4 \delta} = E^{inv}(d, \bar{a}) \cdot \frac{d^2}{\cos^4 \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{\bar{a}}{d} \right) \right]} \quad (13)$$

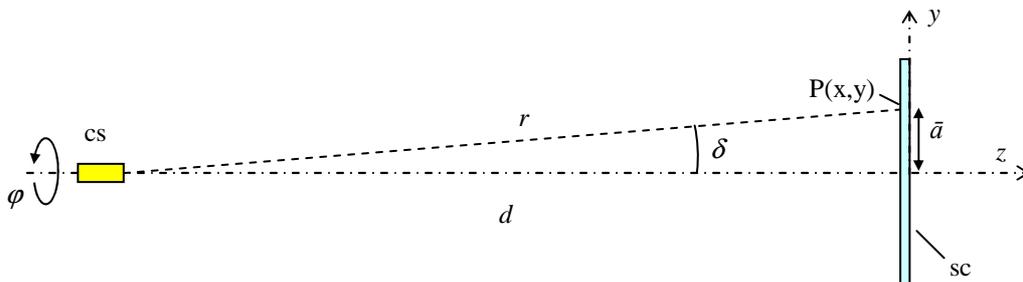


Figura 11. Schema dell'irraggiamento inverso prodotto dal concentratore (cs) sullo schermo (sc) posto a grande distanza dal concentratore.

Il profilo di $E^{inv}(d, \bar{a})$ normalizzato per il valore a $\delta = 0$, $E^{inv}(d, 0) = L^{inv}(d, 0) / d^2$, fornisce l'intensità radiante relativa $I_{rel}(\delta)$:

$$L_{rel}^{inv}(\delta, \varphi) = \frac{L^{inv}(\delta, \varphi)}{L^{inv}(0)} = \frac{L^{inv}(d, \bar{a})}{L^{inv}(0)} = \frac{E^{inv}(d, \bar{a})}{E^{inv}(d, 0)} \cdot \frac{1}{\cos^4 \delta} = E_{rel}^{inv}(d, \bar{a}) \cdot \frac{1}{\cos^4 \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{a}{d} \right) \right]} \quad (14)$$

Da cui ricaviamo per l'efficienza ottica relativa:

$$\eta_{rel}(\delta, \varphi) = E_{rel}^{inv}(\delta, \varphi) \cdot \frac{1}{\cos^4 \delta} = E_{rel}^{inv}(d, \bar{a}) \cdot \frac{1}{\cos^4 \left[\text{tg}^{-1} \left(\frac{a}{d} \right) \right]} \quad (15)$$

Dall'Eq. (15) ricaviamo che l'efficienza ottica relativa del concentratore si può facilmente ricavare dal profilo dell'irradianza prodotta sullo schermo (sc) moltiplicandola per il termine correttivo $[\cos(\delta)]^4$ che, per piccoli valori di δ ha un peso poco rilevante.

4.2 Simulazioni con TracePro®

A completamento di quanto illustrato sinora, è utile effettuare una serie di simulazioni ottiche sul concentratore ideale del Capitolo precedente allo scopo di dimostrare in maniera inequivocabile la validità della teoria esposta. Cominciamo col dimostrare che, investendo il CPC con onde piane provenienti da tutte le direzioni da parte dell'emisfero frontale, otteniamo in uscita dal ricevitore, in assenza di perdite ottiche nel concentratore, un irraggiamento uniforme (irradianza costante) ed inoltre una distribuzione angolare uniforme dei raggi in uscita, che corrisponde alla condizione di radianza costante. Corrispondentemente, in condizioni di perdite ottiche nel concentratore, dovremmo avere sul ricevitore in uscita una distribuzione sia spaziale che angolare non uniforme. Irraggiare il CPC con un insieme di onde piane a tutti i possibili angoli d'incidenza è inutile in quanto il CPC, per angoli poco superiori a quello di accettazione δ_{acc} , non raccoglie praticamente nessun raggio ($\eta = 0$). Nel caso del CPC ideale, $\delta_{acc} = 5^\circ$, si trova che già a 6° d'incidenza l'efficienza ottica è nulla. Per maggiore sicurezza, allora, abbiamo posto un limite a 7° di incidenza massima, δ_{max} . La Fig. 12 mostra un esempio di raytracing con pochi raggi con divergenza massima $\delta_{max} = 7^\circ$. Sull'apertura d'uscita del CPC è stato posto un assorbitore perfetto ($A = 1$) ed è stata studiata la distribuzione del flusso sulla sua superficie. Per una riflettività di parete $R_w = 1.0$, ovvero senza perdite ottiche, e con una simulazione di 500k raggi, abbiamo ottenuto la distribuzione mostrata in Fig. 13. La

mappa è chiaramente piatta su tutta la superficie del ricevitore e dimostra quindi l'uniformità spaziale del flusso.

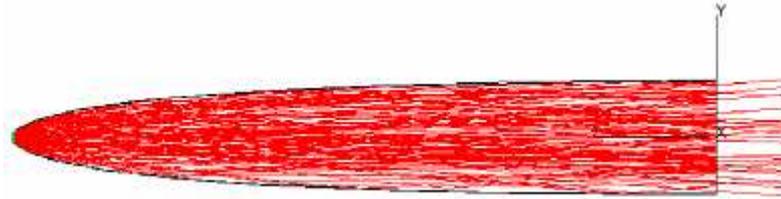


Figura 12. Esempio di raytracing del CPC ideale con un fascio di luce in ingresso collimato entro un certo valore angolare δ_{max} .

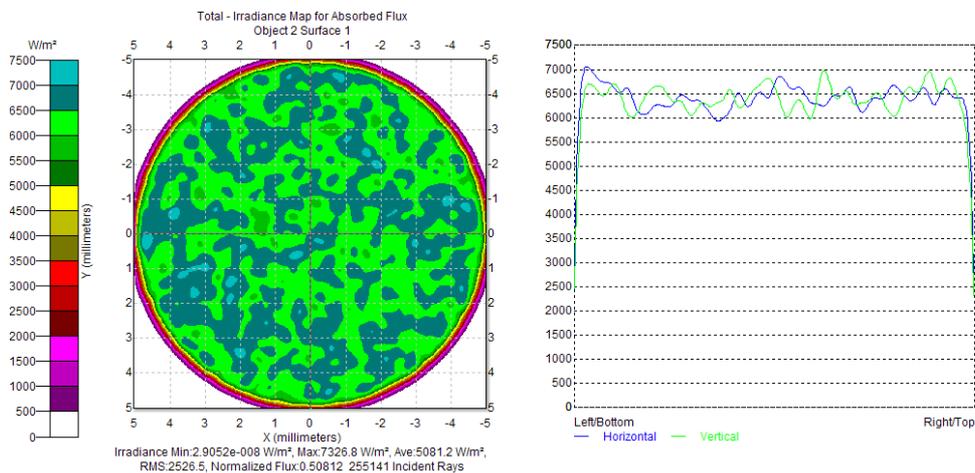


Figura 13. Distribuzione dell'irradianza sul ricevitore per $\delta_{max} = 7^\circ$ e in assenza di perdite ottiche. A destra è mostrato il profilo sugli assi ortogonali x/y.

Se si riducesse la divergenza angolare massima al di sotto dei 5° , mantenendo costanti le altre condizioni, allora ci aspettiamo di avere una distribuzione spaziale del flusso non uniforme. In questo caso, infatti, verrebbe a mancare sul ricevitore quella parte dei raggi proveniente dalle direzioni più inclinate. Questo è dimostrato dalla Fig. 14, dove è riportata la distribuzione del flusso per $\delta_{max} = 4^\circ$.

La Fig. 14 mostra un interessante risultato, ovvero il depauperamento della zona periferica del ricevitore, il che dimostra che i raggi più inclinati in ingresso vengono raccolti prevalentemente sulla periferia del ricevitore.

Per quanto riguarda la distribuzione spaziale del flusso sul ricevitore in presenza di perdite ottiche, ci aspettiamo che essa non sia uniforme, in considerazione del fatto che le perdite ottiche aumentano con il numero di riflessioni sulla parete e che il numero di riflessioni non è lo stesso per i raggi che escono

attraverso diverse regioni dell'apertura di uscita. Questo è, infatti, quello che si trova simulando la distribuzione del flusso per $\delta_{max} = 7^\circ$ e per una riflettività di parete $R = 0.8$, come mostrato in Fig. 15.

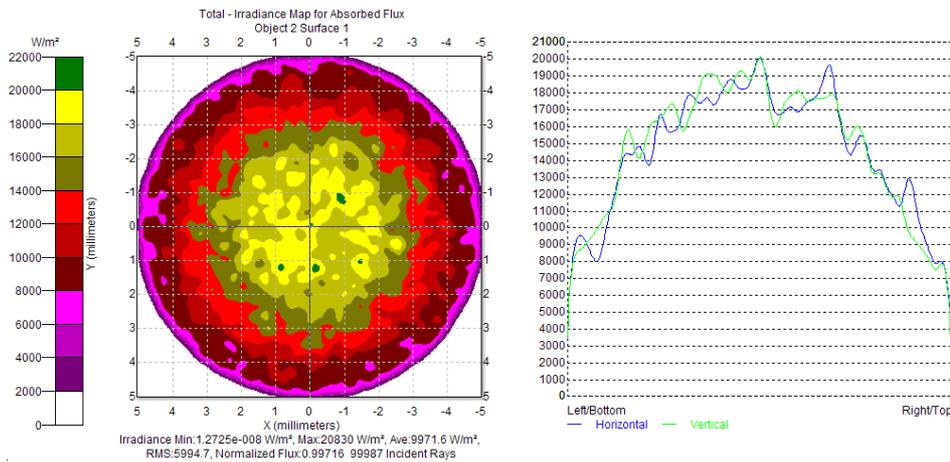


Figura 14. Distribuzione dell'irradianza sul ricevitore per $\delta_{max} = 4^\circ$ e in assenza di perdite ottiche. Raytracing con 100k raggi.

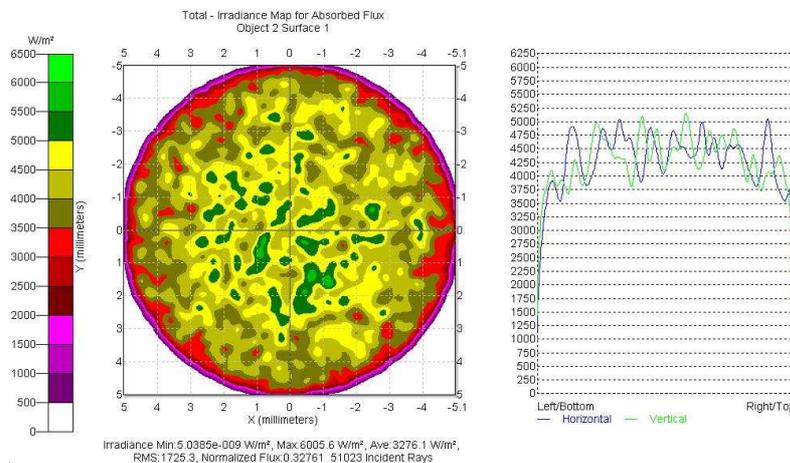


Figura 15. Distribuzione dell'irradianza sul ricevitore per $\delta_{max} = 7^\circ$ e in presenza di perdite ottiche ($R_w = 0.8$). Raytracing con 100k raggi.

Per l'analisi della distribuzione angolare dei raggi in uscita, abbiamo mantenuto aperta l'uscita del concentratore e collocato uno schermo di forma emisferica con superficie interna assorbente, centrato esattamente sul centro dell'apertura di uscita del CPC, come mostrato in Fig. 16. Simulando in tal modo il metodo diretto con 100k raggi si ottiene una distribuzione uniforme del flusso sullo schermo, come mostrato in Fig. 17, che dimostra l'uniformità angolare del flusso in uscita dal concentratore, ovvero che

l'uscita dei raggi dal CPC avviene con una radianza costante. A prima vista il risultato di Fig. 17 può sorprendere per il fatto che per una sorgente Lambertiana ci si aspetta un'intensità radiante funzione di $\cos(\delta_{out})$, come richiesto dall'Eq. (9'), e quindi con un profilo non uniforme. Per dimostrare che il risultato di Fig. 17 è in accordo con le proprietà di una sorgente Lambertiana, facciamo riferimento alla Fig. 18.

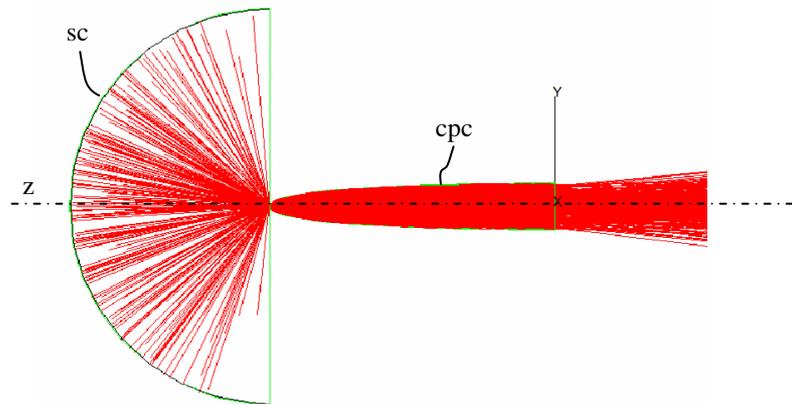


Figura 16. Esempio di raytracing con pochi raggi del CPC ideale con un fascio di luce in ingresso collimato entro un angolo $\delta_{max} = 7^\circ$, parete senza perdite ($R_w = 1$), apertura d'uscita aperta e schermo semicircolare per raccogliere i raggi in uscita dal concentratore.

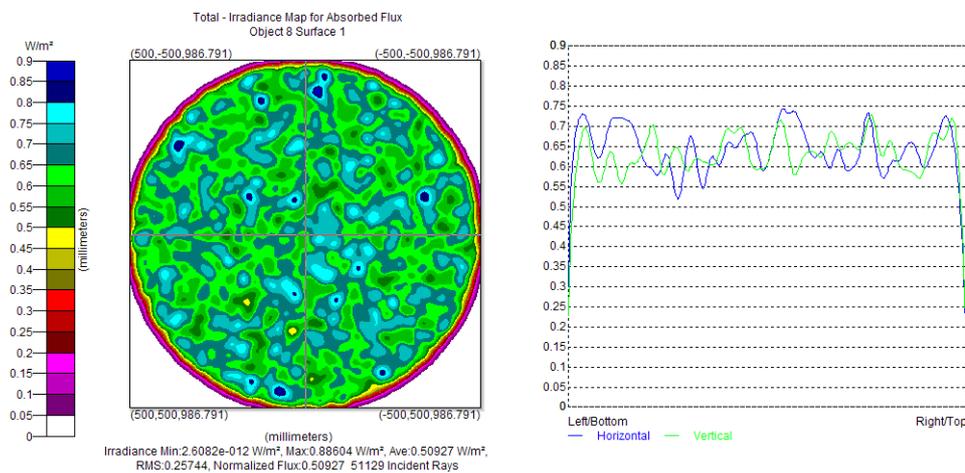


Figura 17. Distribuzione del flusso sullo schermo semisferico posto in uscita dal CPC. Condizioni di simulazione: $\delta_{max} = 7^\circ$ e assenza di perdite ottiche. A destra è mostrato il profilo sugli assi ortogonali x/y della mappa di sinistra.

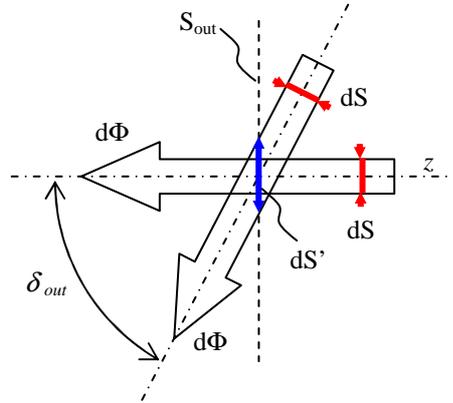


Figura 18. Schematizzazione dell'irraggiamento dell'uscita del concentratore con dei fasci elementari di luce diversamente orientati.

Il raggio elementare generico è caratterizzato da un flusso $d\Phi$ e da una sezione ortogonale dS costanti, ovvero indipendenti dall'angolo di uscita δ_{out} . Il raggio elementare intercetta l'apertura di uscita sul piano S_{out} con un'area pari a: $dS' = dS / \cos \delta_{out}$. Consideriamo ora la superficie S_{out} come una sorgente luminosa e analizziamone le proprietà. L'unità di superficie emette, in direzione δ_{out} , un flusso per unità di angolo solido (intensità radiante) pari a:

$$I_{uni}(\delta_{out}) = d\Phi / (dS / \cos \delta_{out}) = cost \cdot \cos \delta_{out} \quad (16)$$

e la corrispondente radianza $L_{uni}(\delta_{out})$ si ottiene dividendo $I_{uni}(\delta_{out})$ per la proiezione dell'area unitaria lungo la direzione δ_{out} :

$$L_{uni}(\delta_{out}) = I_{uni}(\delta_{out}) / \cos \delta_{out} = d\Phi / dS = cost \quad (17)$$

Le Eq. (16) e (17) esprimono l'intensità radiante e la radianza di una sorgente Lambertiana. L'intensità misurata sullo schermo semisferico assorbente di Fig. 16 non corrisponde a quella espressa dall'Eq. (16) in quanto la superficie di emissione del fascio elementare impiegato nel programma TracePro® non è costante ma uguale a: $dS' = dS / \cos \delta_{out}$. Essa sarà quindi data, in accordo con quanto mostrato in Fig. 18, da:

$$I_{tracepro}(\delta_{out}) = I_{uni}(\delta_{out}) / \cos \delta_{out} = d\Phi / dS = cost \quad (18)$$

Se si introducono perdite ottiche nel concentratore, ad esempio imponendo $R_w = 0.8$, non si ottiene più una distribuzione uniforme del flusso sullo schermo semisferico, come mostrato in Fig. 19.

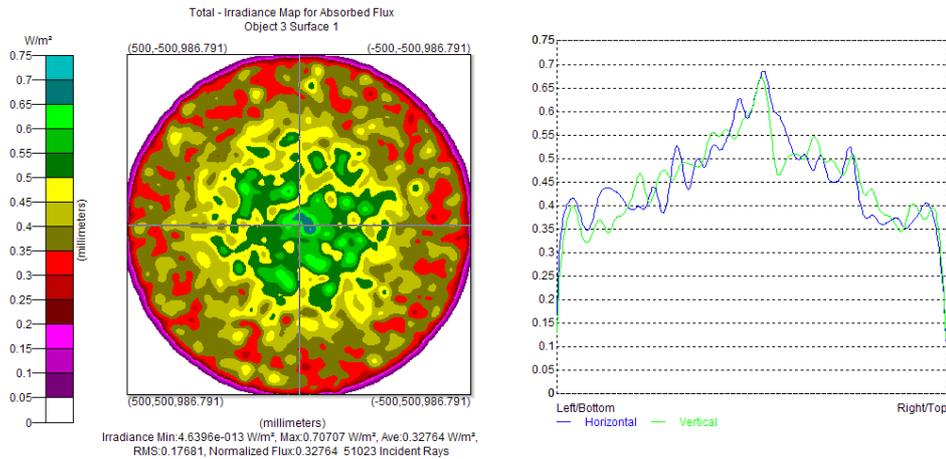


Figura 19. Distribuzione del flusso sullo schermo semicircolare posto in uscita dal CPC. Condizioni di simulazione: $\delta_{max} = 7^\circ$ e presenza di perdite ottiche ($R_w = 0.8$).

5. APPLICAZIONI DEL METODO “ILLUME”

Simulazioni ottiche e misure sperimentali sono state effettuate su una serie di concentratori del tipo CPC, quali CPC ideali semplicemente troncati e CPC troncati e squadrati sull’apertura d’ingresso, da impiegare per la realizzazione di moduli fotovoltaici a concentrazione. Tutti i risultati che seguono dimostrano la semplicità e validità del metodo di caratterizzazione proposto.

5.1 CPC troncato (Half truncated CPC: HT-CPC)

Analizziamo un concentratore CPC ricavato da un CPC ideale troncato a metà nella sua lunghezza. Il CPC ideale di origine è diverso da quello finora trattato. Le caratteristiche dimensionali dell’HT-CPC sono: diametro dell’apertura d’ingresso di 10.4 cm, diametro dell’apertura d’uscita di 1 cm, ($\sim 85 \text{ cm}^2$ è l’area d’ingresso), lunghezza di 35.8 cm. Da essi ricaviamo un rapporto geometrico di concentrazione $C_{geo} = 108x$ ed un angolo di accettazione $\delta_{acc} \sim 5^\circ$. La Fig. 20 mostra schematicamente il concentratore HT-CPC.

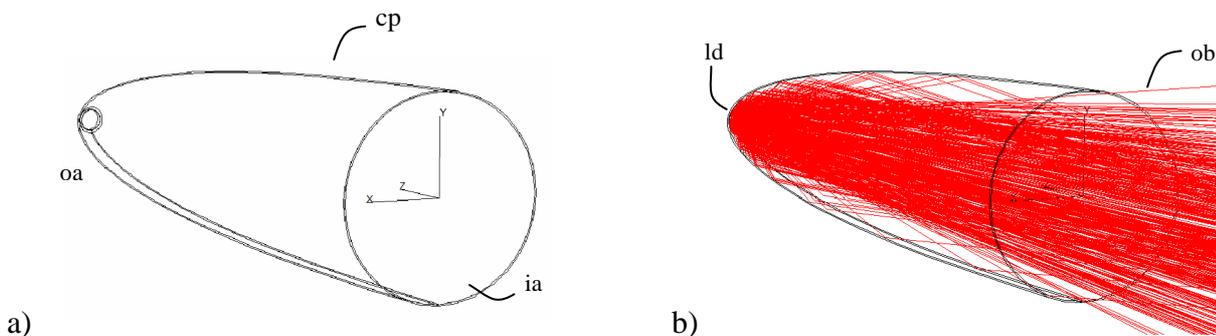
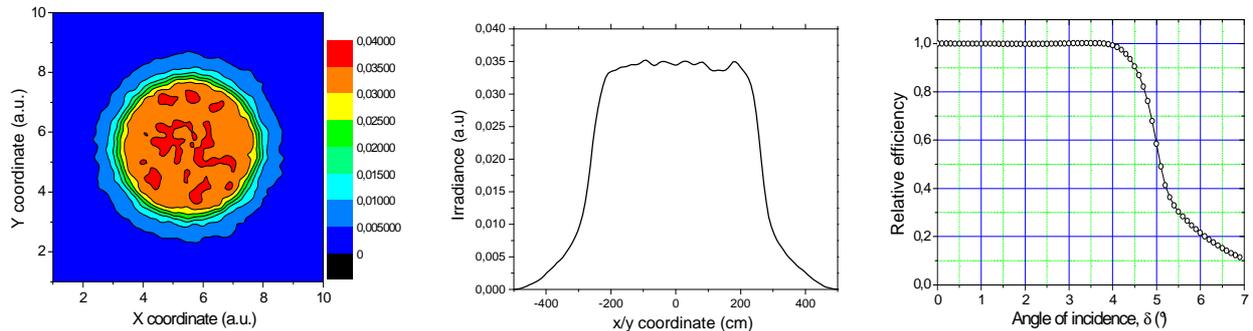


Figura 20. a) Schema prospettico del concentratore HT-CPC. b) Esempio di raytracing con TracePro® dell’illuminazione inversa con un fascio collimato di 10 mm di diametro.

Applicando un diffusore Lambertiano sull'apertura di uscita (oa) e illuminandolo con un fascio collimato, abbiamo effettuato diverse simulazioni col metodo ILLUME. Illuminando dapprima l'intero diffusore, otteniamo, su uno schermo di 1000-cm di diametro posto a 3000-cm di distanza dall'apertura d'ingresso (ia), la mappa di irradianza riportata in Fig. 21. Applicando l'Eq. (15), si trova un angolo di accettazione di 4.5° per il 90% di efficienza e 5.1° per il 50% di efficienza. Gli stessi valori si ottengono con il procedimento d'illuminazione diretta (vedi Tab. 1).

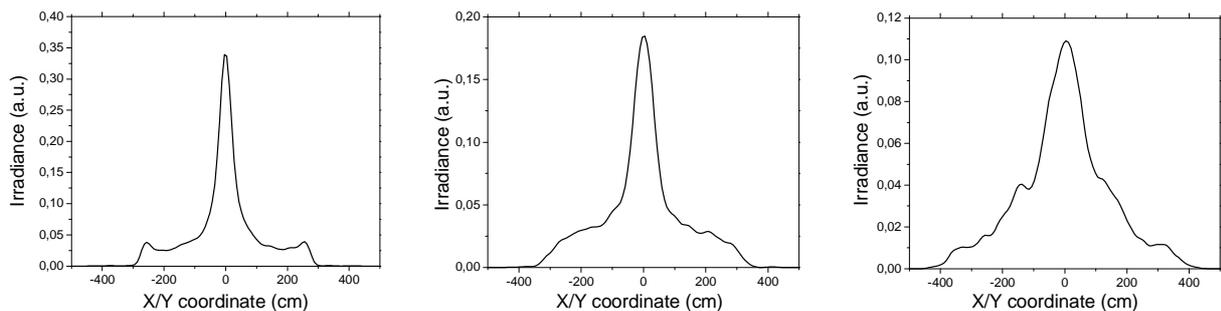
Il metodo ILLUME diventa un potente mezzo di analisi delle proprietà ottiche del concentratore se il diffusore è localmente illuminato, ovvero modulando spazialmente l'illuminazione del diffusore. In questo modo si è in grado di derivare la curva di efficienza relativa $\eta_{rel}(\delta)$ specifica della regione illuminata e di stabilire l'intervallo degli angoli d'incidenza in corrispondenza dei quali quella regione raccoglie un'onda piana in ingresso con più o meno efficienza. Un primo esempio di questa procedura è dato qui appresso simulando l'illuminazione inversa del centro del diffusore nell' HT-CPC per mezzo di un fascio collimato di sezione variabile. I profili di irradianza, $E(d, x)$ e $E(d, y)$, presi al centro dello schermo (sc) sono stati mediati e riportati in Fig. 22 per diversi valori del raggio R .



a)

b) c)

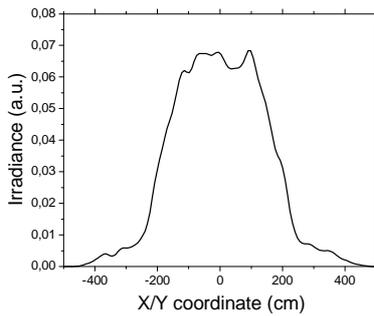
Figura 21. a) Mappa d'irradianza ILLUME ottenuta per raytracing (100k raggi) dell'HT-CPC con un fascio collimato di 5.0 mm di raggio incidente al centro del diffusore. b) Profilo medio dell'irradianza sullo schermo lungo le direzioni x/y. c) Efficienza relativa calcolata simulando il metodo diretto di illuminazione dell'HT-CPC



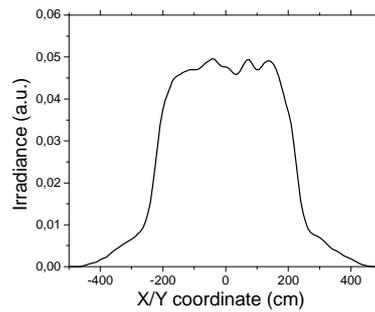
a)

b)

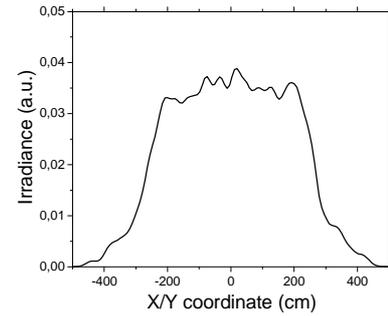
c)



d)



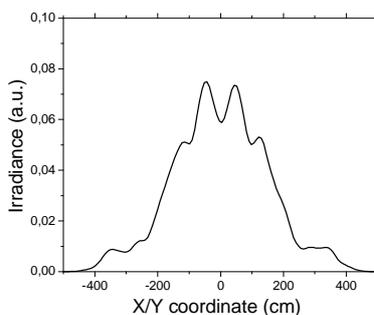
e)



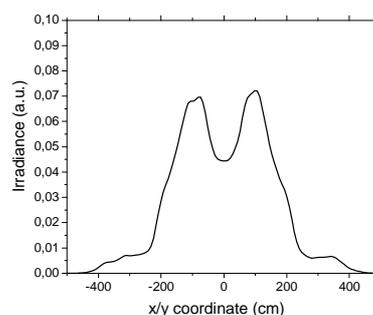
f)

Figura 22. Profili d'irradianza ottenuti per simulazione del metodo inverso del concentratore HT-CPC. I profili sono stati presi per diverse sezioni del fascio in ingresso (ib), centrato sul diffusore. a) $R = 0.05$ mm (scala 0.4 W/m^2); b) $R = 0.5$ mm (scala 0.2 W/m^2); c) $R = 1.0$ mm (scala 0.12 W/m^2); d) $R = 2.5$ mm (scala 0.08 W/m^2); e) $R = 3.5$ mm (scala 0.06 W/m^2) f) $R = 5.0$ mm (scala 0.05 W/m^2).

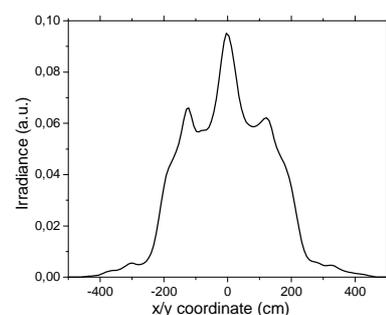
I profili, che riguardano un intervallo angolare di $\pm 9.5^\circ$, sono caratterizzati da una curva di efficienza la cui larghezza a metà altezza cresce monotonamente con l'aumentare del raggio R . Questo significa che l'illuminazione delle zone via via più lontane dal centro del diffusore richiede un fascio collimato in ingresso via via sempre più inclinato rispetto all'asse ottico. Per valori molto bassi di R il profilo è molto stretto, a dimostrazione di un risultato ben noto per chi impiega un CPC per applicazioni fotovoltaiche, ovvero che un fascio collimato pressoché allineato con l'asse ottico del CPC illumina prevalentemente il centro del ricevitore. Questo naturalmente costituisce un problema, giacché una cella solare a concentrazione non può lavorare con forti disuniformità d'illuminazione; esistono comunque diversi modi per ovviare a questo inconveniente. E' interessante notare la presenza di picchi satellite a $\pm 4.7^\circ$ in Fig. 22(a). I profili cambiano drasticamente di forma all'aumentare della sezione del fascio collimato e l'intensità diminuisce di un fattore sette. Aumentando il raggio del fascio, i picchi satellite, ben visibili in Fig. 22(a) per $R = 0.05$ mm, scompaiono a $R \sim 0.25$ mm, lasciando un largo background; il picco centrale diminuisce progressivamente fino a scomparire, e il largo background si trasforma, per $R=5.0$ mm, nel largo e piatto profilo tipico di un CPC ideale.



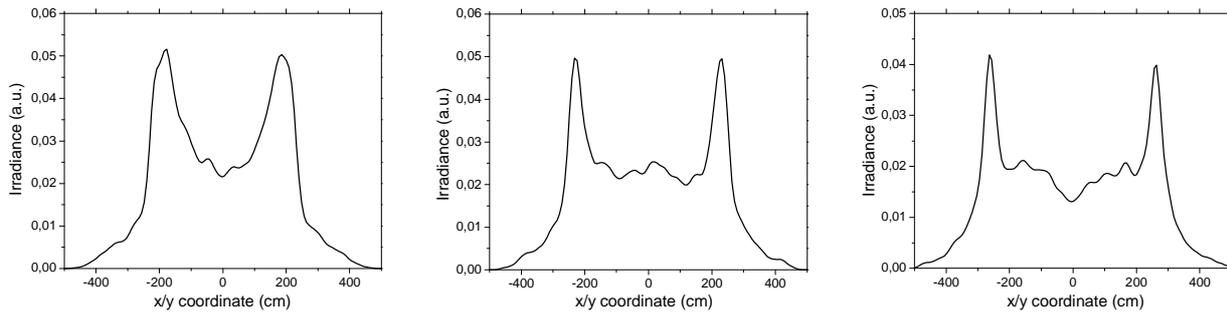
a)



b)



c)



d)

e)

f)

Figura 23. Profili d'irradianza ottenuti simulando con 50k raggi il metodo inverso per il concentratore HT-CPC. I profili sono stati presi lungo gli assi x and y per diversi valori del raggio interno R_{int} della corona circolare (il diametro esterno è messo tra parentesi). a) $R_{int} = 0.5$ (1.25) mm (scala 0.1 W/m^2); b) $R_{int} = 1.0$ (1.414) mm (scala 0.1 W/m^2); c) $R_{int} = 2.0$ (2.245) mm (scala 0.1 W/m^2); d) $R_{int} = 3.0$ (3.165) mm (scala 0.06 W/m^2); e) $R_{int} = 4.0$ (4.123) mm (scala 0.06 W/m^2); f) $R_{int} = 4.9$ (5.0) mm (scala 0.05 W/m^2).

Questo dimostra che, anche se dimezzato, un CPC ideale mantiene quasi inalterate le sue proprietà ottiche. Per ottenere più in dettaglio l'efficienza delle regioni che si trovano a diversa distanza dal centro del diffusore (ricevitore), abbiamo modulato diversamente il fascio in ingresso dandogli la forma di un anello, o di una corona circolare, con raggio interno R_{int} e raggio esterno R_{ext} , e di area costante e pari a $\pi \text{ mm}^2$. I profili medi d'irradianza relativi agli assi x/y sono riportati in Fig. 23 per valori crescenti del raggio R_{int} .

I profili di Fig. 23 mostrano un'evoluzione dell'efficienza molto diversa da quella di Fig. 22. Per prima cosa si osserva una riduzione dell'intensità tra i due estremi che raggiunge al massimo un fattore due. Il profilo si mantiene sempre piuttosto largo e soltanto per un valore di $R_{int} = 3 \text{ mm}$ si ha lo sviluppo di due intense bande laterali che dimostrano come l'illuminazione delle zone più periferiche del ricevitore richieda un fascio più divergente.

5.2 CPC troncato e squadrato (TS-CPC)

La Fig. 24 mostra il CAD di un CPC troncato e squadrato (TS-CPC). Il CPC originale è stato troncato per ridurre la sua lunghezza e la sua apertura è stata squadrata al fine di avere una forma adatta ad impacchettare più unità ottiche all'interno di un modulo a concentrazione (modulo CPV). Il TS-CPC ha un'apertura d'ingresso di 10-cm di lato, un'apertura di uscita di 1-cm di diametro e una lunghezza di 35 cm. Il prototipo è stato realizzato lavorando un prisma di poliuretano [11] e rivestendolo internamente con il film polimerico VM2002 Radiant Mirror Film della 3M [12]. La riflettività media della parete interna del CPC è stata misurata con fascio laser polarizzato a $\lambda = 633 \text{ nm}$, effettuando due misure con laser orientato a 0° e 90° (vedi Fig. 25). E' stato ottenuto un valore medio di $R_w = 0.95 \pm 0.01$ [7, 8]. Il processo di squadratura produce quattro superfici planari che s'incontrano ai vertici dell'apertura d'ingresso. Come vedremo, queste quattro superfici avranno un effetto particolare sulle proprietà ottiche del concentratore.

La simulazione con metodo inverso ha prodotto, su uno schermo (sc) di 500-cm di lato posto a 3000-cm di distanza dal TS-CPC, la mappa d'irradianza di Fig. 26(a) e il corrispondente profilo medio lungo gli assi x/y di Fig. 26(b).

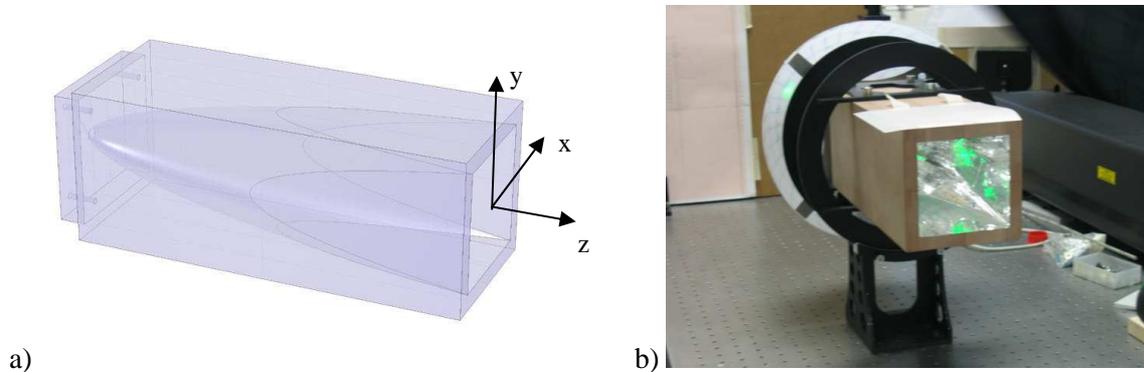


Figure 24. a) Vista prospettica di un modello di CPC troncato e squadrato (TS-CPC). b) Prototipo del TS-CPC durante una caratterizzazione con laser.

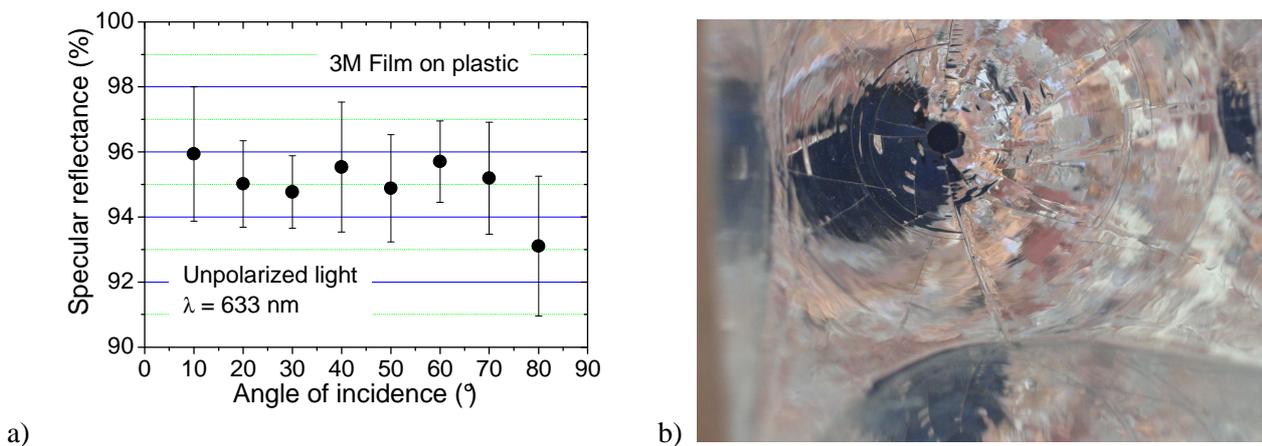
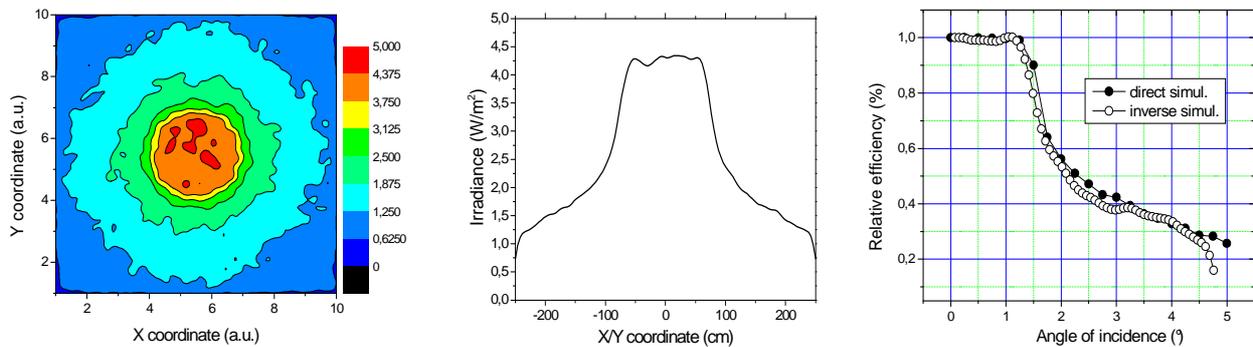


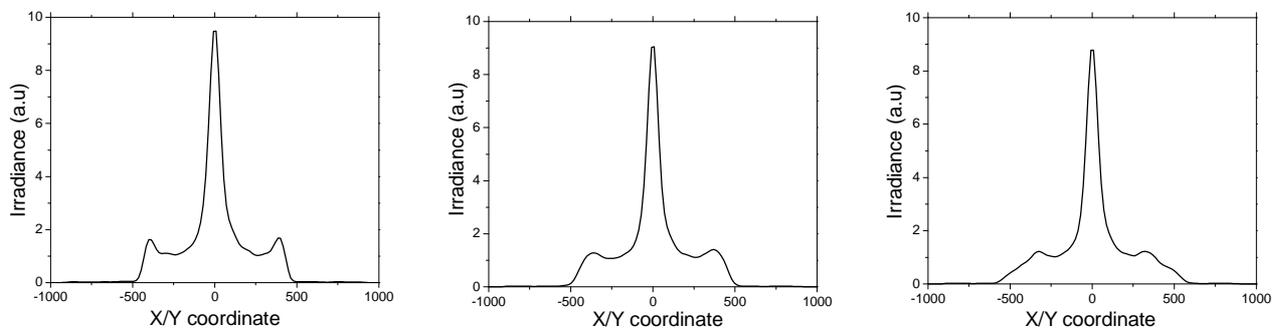
Figure 25. a) Dati di riflettanza speculare del campione film 3M/substrato di poliuretano a $\lambda = 633$ nm in funzione dell'angolo d'incidenza del fascio laser. La riflettanza media è di 95 ± 1 %. b) Foto della parete interna del TS-CPC.

L'efficienza relativa simulata $\eta_{rel}(\delta)$ è ottenuta dal profilo d'irradianza applicando l'Eq. (15) ed è mostrata in Fig. 26(c), cerchi bianchi. La curva di efficienza si mantiene piatta fino a $\sim 1.2^\circ$, decresce rapidamente al 50%, quindi discende lentamente. La Fig. 26(c) mostra anche la curva di $\eta_{rel}(\delta)$ ottenuta per simulazione del metodo diretto (cerchi neri): l'accordo è eccellente. Le piccole differenze possono essere attribuite al numero limitato di raggi impiegati nel processo di raytracing. Per gli angoli di accettazione, otteniamo per il metodo inverso 1.4° e 2.1° al 90% e 50% di efficienza, rispettivamente; i corrispondenti angoli per il metodo diretto sono 1.5° e 2.3° (vedi Tab. 1).

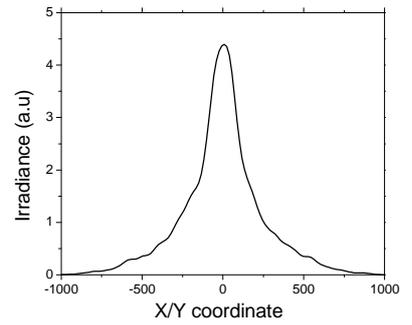
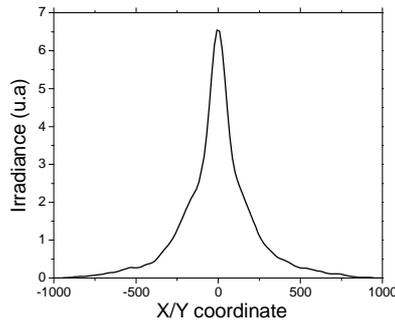
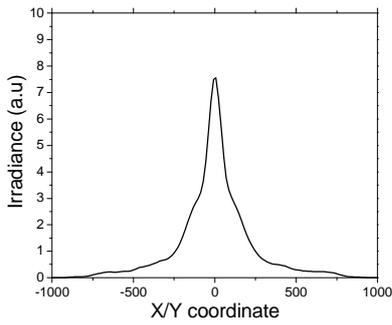
Simulando l'illuminazione inversa del centro del diffusore con un fascio collimato di sezione variabile, come fatto nella precedente applicazione, otteniamo i profili $E(d, x)$ e $E(d, y)$, registrati su uno schermo quadro di 2000-cm di lato posto a 3000 cm di distanza dal TS-CPC. Le direzioni x e y corrispondono ai lati dell'apertura d'ingresso del TS-CPC (vedi Fig. 24). Il profilo medio è riportato in Fig. 27 per valori crescenti del raggio. L'ultimo valore (5 mm) è quello richiesto per illuminare l'intera superficie del diffusore e quindi coincide con il profilo di Fig. 26(b). L'intervallo angolare si estende a $\pm 18.4^\circ$. Come nel caso dell'HT-CPC, si nota un allargamento del profilo e una riduzione della sua intensità (di un fattore due) con l'aumentare della sezione del fascio collimato e quindi, corrispondentemente, si ha un aumento dell'angolo di accettazione. Anche qui si nota la presenza di picchi satellite in corrispondenza di $\pm 7.2^\circ$. In corrispondenza di quest'angolo, l'apertura squadrata del CPC inizia ad ombreggiare il ricevitore circolare. Concentrando l'illuminazione inversa al centro del diffusore (Fig. 27(a)), si produce un profilo d'irradianza molto stretto, che corrisponde ad un fascio diretto molto ben allineato con l'asse ottico.



a) Mappa d'irradianza del TS-CPC, ottenuta per simulazione con metodo inverso applicando un fascio collimato (ib) di 5-mm al diffusore. b) Profilo x/y medio. c) Efficienza ottica relativa, $\eta_{rel}(\delta)$, del TS-CPC ottenuta col metodo diretto (cerchi neri) e inverso (cerchi bianchi).



a) b) c)

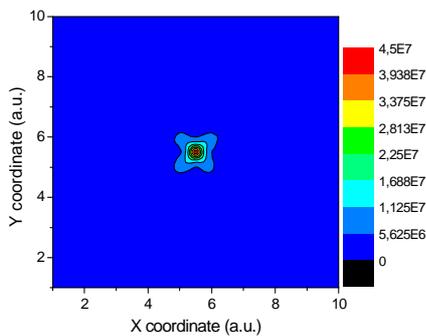


d)

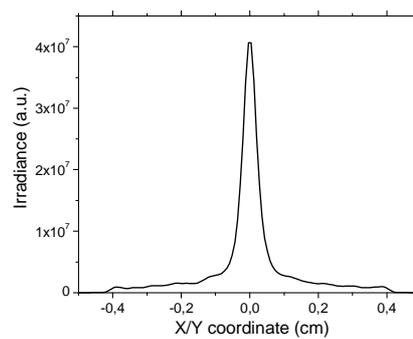
e)

f)

Figure 27. Profili d'irradianza ottenuti simulando (20k raggi) il metodo inverso per il concentratore TS-CPC per diversi valori del raggio del fascio collimato. a) $R = 0.05$ mm (scala 10 W/m^2); b) $R = 0.5$ mm (scala 10 W/m^2); c) $R = 1.0$ mm (scala 10 W/m^2); d) $R = 2.5$ mm (scala 10 W/m^2); e) $R = 3.5$ mm (scala 7 W/m^2); f) $R = 5.0$ mm (scala 5 W/m^2).

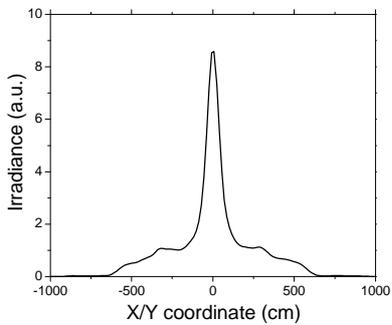


a)

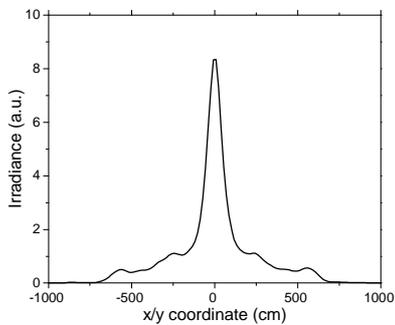


b)

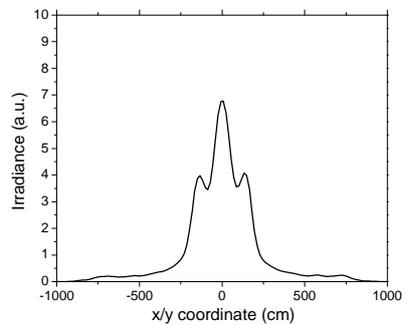
Figura 28. a) Mappa d'irradianza simulata ottenuta su un ricevitore di 1-cm di diametro del TS-CPC, illuminato da un'onda piana allineata con l'asse ottico. b) Corrispondente profilo medio d'irradianza lungo le direzioni x e y .



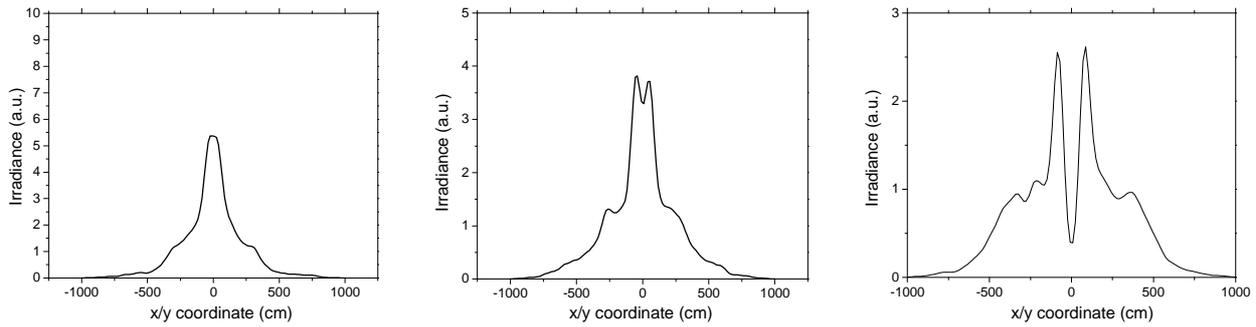
a)



b)



c)



d)

e)

f)

Figura 29. Profili d'irradianza ottenuti simulando il concentratore TS-CPC col metodo inverso per diversi valori del raggio interno R_{int} della corona circolare (il diametro esterno è messo tra parentesi). a) $R_{int} = 0.5$ (1.25) mm (scala 10 W/m^2); b) $R_{int} = 1.0$ (1.414) mm (scala 10 W/m^2); c) $R_{int} = 2.0$ (2.245) mm (scala 10 W/m^2); d) $R_{int} = 3.0$ (3.165) mm (scala 10 W/m^2); e) $R_{int} = 4.0$ (4.123) mm (scala 5 W/m^2); f) $R_{int} = 4.9$ (5.0) mm (scala 3 W/m^2). Il profilo con $R_{int} = 0.0$ (1.0) mm non è mostrato poiché corrisponde a quello con $R = 1.0$ mm di Fig. 26.

Questo risultato, visto nella prospettiva di raggi diretti, mostra, come accennato precedentemente, che nell'ottica senza immagine un fascio ben allineato con l'asse ottico ($\delta = 0^\circ$) produce in uscita del CPC un irraggiamento molto intenso al centro del ricevitore. Questo è dimostrato qui attraverso la simulazione diretta di Fig. 28, in cui è riportato il profilo d'irradianza prodotto su un ricevitore assorbente all'uscita del TS-CPC da parte di un'onda piana diretta lungo la direzione z ($\delta = 0^\circ$).

Come nel caso dell'HT-CPC, abbiamo studiato l'efficienza ottica di regioni del diffusore poste a diversa distanza dal centro, impiegando un fascio collimato inverso di forma anulare e area costante ($\pi \text{ mm}^2$). I profili medi d'irradianza sullo schermo (sc) sono riportati in Fig. 29 per valori crescenti di R_{int} . Notiamo un allargamento del profilo al crescere di R_{int} , nonché un notevole cambiamento della sua forma. Come nel caso dell'HT-CPC, si ha la comparsa di due picchi simmetrici per grandi valori di R_{int} , anche se questa volta risultano molto più vicini tra loro. Notiamo anche la quasi scomparsa del picco centrale, a dimostrazione che l'illuminazione diretta del TS-CPC con un fascio allineato sull'asse z non sarebbe in grado di illuminare la periferia del ricevitore, come dimostra il profilo di Fig. 28. Quindi, se col metodo inverso illuminiamo la periferia estrema del ricevitore, non possiamo estrarre dal TS-CPC dalla parte dell'ingresso un fascio allineato con l'asse z . Come conseguenza, l'efficienza ottica in prossimità di $\delta = 0^\circ$ per la regione più periferica del ricevitore deve risultare molto bassa.

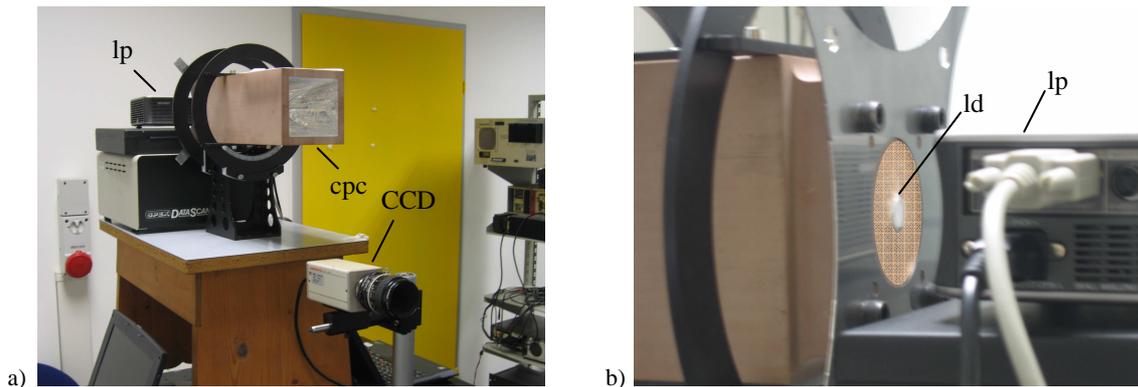
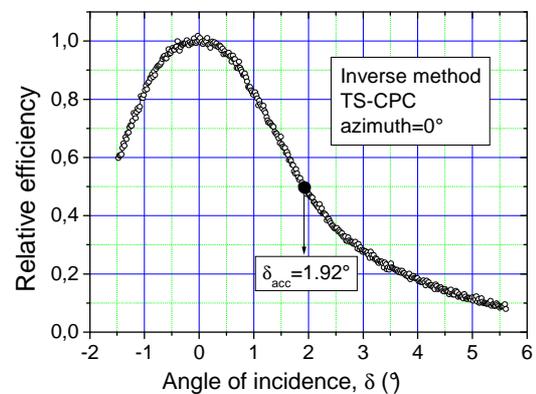
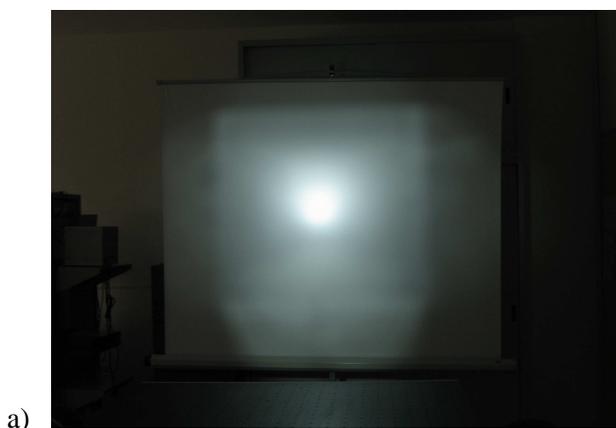


Figure 30. a) Set-up sperimentale del metodo ILLUME. Il proiettore (lp) illumina il diffusore semitrasparente (ld) posto sul retro del TS-CPC. La camera CCD camera è posta tra TS-CPC e schermo (sc). b) Particolare dell'apparato.

Sul concentratore TS-CPC sono state effettuate alcune misure sperimentali seguendo lo schema di Fig. 6 con la sorgente (lp) posta dietro il CPC (vedi la Fig. 30). La luce diffusa dal CPC è stata proiettata su uno schermo bianco posto a 345 cm di distanza. La Fig. 31(a) mostra l'immagine prodotta sullo schermo e registrata con la videocamera CCD 8484-05G della Hamamatsu Photonics. L'immagine riassume le proprietà ottiche del TS-CPC. Notiamo il contorno squadrato prodotto dall'apertura d'ingresso (ia) e della luce che si protrae oltre tale contorno per effetto delle riflessioni sulle quattro pareti piane. Al centro dell'immagine è visibile un intenso spot circolare su cui è stato misurato il profilo orizzontale centrato sullo spot. Da questo, applicando il termine correttivo $(\cos\delta)^4$ dell'Eq. (14), è stata tratta la radianza relativa, $L_{rel}(\delta)$, la quale, secondo l'Eq. (15) corrisponde all'efficienza ottica relativa $\eta_{rel}(\delta)$ del metodo di illuminazione diretta. Dal profilo della Fig. 31(b) deriviamo un angolo di accettazione di 0.8° al 90% di efficienza e di 1.9° al 50% di efficienza (vedi la Tab. 1).



a)

b)

Figura 31. a) Immagine CCD della luce diffusa sullo schermo (sc) dal TS-CPC illuminato in modo inverso. b) Radianza relativa inversa $L_{rel}(\delta)$, calcolata applicando l'Eq. (14) al profilo d'irradianza $E_{rel}(d, x)$ misurato sullo schermo. La radianza relativa corrisponde all'efficienza relativa $\eta_{rel}(\delta)$ del concentratore..

Metodo		3D-CPC ideale		HT-CPC		TS-CPC	
		90% Eff	50% Eff	90% Eff	50% Eff	90% Eff	50% Eff
Diretto	Simulato	4.5°	5.0°	4.5°	5.1°	1.5°	2.3°
	Sperimentale					1.1° (laser)	2.8° (laser)
Inverso	Simulato	4.5°	5.0°	4.5°	5.1°	1.4°	2.1°
	Sperimentale					0.8°	1.9°

Tabella 1. Sommario dei valori di angolo di accettazione simulati e sperimentali, relativi al metodo diretto e inverso, per i concentratori 3D-CPC analizzati in questo lavoro. Gli angoli di accettazione sono riferiti ai valori di efficienza del 90% e 50%. I dati del TS-CPC si riferiscono a un azimut $\varphi = 0^\circ$.

6. CONCLUSIONI

In conclusione, abbiamo introdotto un nuovo metodo per la caratterizzazione ottica di concentratori solari, ovvero per lo studio della loro efficienza ottica, chiamato ILLUME (Inverse Illumination Method), semplice da realizzare sperimentalmente, richiedendo soltanto un laser o una lampada e una camera digitale o CCD. Tramite questo metodo, una singola simulazione oppure una singola misura sperimentale è sufficiente per determinare l'efficienza ottica relativa e l'angolo di accettazione del concentratore. Abbiamo applicato il metodo ILLUME a diversi tipi di concentratori di tipo "senza immagine" (nonimaging), attraverso simulazioni con programmi di ottica commerciali e attraverso misure sperimentali di laboratorio. In tutti i casi si trova che l'efficienza ottica e l'angolo di accettazione sono consistenti con quelli ricavati da metodi di caratterizzazione convenzionali.

Il metodo inverso ILLUME è stato presentato in due congressi internazionali [13, 14].

7. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia P. Colombani (Paolo Colombani Design) per il supporto ricevuto per la realizzazione dei prototipi di concentratore ed E. Chiodelli (Photo Analytical Srl) per il supporto ricevuto per le misure sperimentali.

RIFERIMENTI

- [1] G. Martinelli, c. Malagù, M. Stefancich, D. Vincenzi, A. Parretta and R. Winston, “*Optical beam splitting and CPC for high performances photovoltaic concentrator systems*” oral presentation at the “19th Congress of International Commission for Optics, ICO XIX, Optics for the Quality of Life”, Firenze, 25-30 August 2002. Technical Digest vol. II, ed. By A. Consortini and G.C. Righini (Washington, USA: SPIE Vol. 4829) 2002, pp. 1023-1024.
- [2] A. Parretta, G. Martinelli, M. Stefancich, D. Vincenzi and R. Winston, “*Modelling of CPC-based photovoltaic concentrator*” oral presentation at the “19th Congress of International Commission for Optics, ICO XIX, Optics for the Quality of Life”, Firenze, 25-30 August 2002. Technical Digest vol. II, ed. By A. Consortini and G.C. Righini (Washington, USA: SPIE Vol. 4829) 2002, pp. 1011-1012.
- [3] A. Parretta, M. Morvillo, C. Privato, G. Martinelli and R. Winston, “*Modelling of 3D-CPCs for concentrating photovoltaic systems*” oral presentation at the Conference “PV in Europe, from PV Technology to Energy Solutions”, Rome, Italy, 7-11 October 2002. Ed. J.L. Bal, G. Silvestrini, A. Grassi, W. Palz, R. Bigotti, M. Gamberane, P. Helm. WIP-Munich and ETA-Florence, 2002, pp. 547-550.
- [4] R. Winston, J.C. Miñano and P. Benítez, “*Nonimaging Optics*” Elsevier Academic Press, Burlington, MA 01803, USA, 2005.
- [5] A.W. Bett, F. Dimroth, S.W. Glunz, A. Mohr, G. Siefer, G. Willeke, “*FLATCONTM and FLASHCONTM concepts for high concentration PV*”, Proc. Of the 19th EPSEC, 7-11 June 2004, Paris. Ed. W. Hoffmann, J.-L. Bal, H. Hossenbrink, W. Palz, P. Helm, WIP-Munich and ETA-Florence, 2004, pp. 2488-2491.
- [6] Lambda Research Corporation, 80 Taylor Street, P.O. Box 1400, Littleton, MA 01460, <http://www.lambdares.com/>.
- [7] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, V. Franceschini, G. Martinelli, M. Armani, “*Characterization of CPC solar concentrators by a laser method*”, oral presentation at the SPIE Optics and Photonics Conference, San Diego, California (USA), 26-30 August 2007.
- [8] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, V. Franceschini, G. Martinelli, M. Armani, “*Laser Characterization of 3D-CPC Solar Concentrators*”, visual presentation at the 22nd European

Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Fiera Milano, 3–7 September 2007, Milan, Italy.

- [9] V. Franceschini, “*Caratterizzazione ottica con fascio laser e simulazione di concentratori solari non-imaging*”, Università degli Studi di Ferrara, Anno Accademico 2006-2007. Relatori M. Stefancich e A. Parretta.
- [10] A. Parretta, C. Privato, G. Nenna, A. Antonini, and M. Stefancich, “*Monitoring of concentrated radiation beam for photovoltaic and thermal solar energy conversion applications*”, *Applied Optics* **45**, 7885-7897, 2006.
- [11] Paolo Colombani Design, Ferrara, Italy, www.paolocolumbani.com.
- [12] www.3m.com/radiantlightfilm
- [13] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, G. Martinelli, M. Armani, “*Inverse illumination method for characterization of CPC concentrators*”, oral presentation at the SPIE Optics and Photonics Conference, San Diego, California (USA), 26-30 August 2007.
- [14] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, G. Martinelli, M. Armani, “*Optical Characterization of CPC Concentrator by an Inverse Illumination Method*”, visual presentation at the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Fiera Milano, 3–7 September 2007, Milan, Italy. Subject 1: Advanced Photovoltaics. Subsection 1.4: Terrestrial Concentrator Systems.