

Concentrazione fv

# IL METODO INVERSO

## svela le proprietà dei concentratori solari

Scoperto dal ricercatore italiano Antonio Parretta, il metodo "inverso" consente di effettuare velocemente e con mezzi semplici la caratterizzazione ottica completa di un concentratore solare. Basta registrare l'immagine prodotta su uno schermo illuminando il concentratore al contrario per estrarre il profilo dell'efficienza ottica in funzione dell'angolo d'incidenza della luce per qualunque piano d'incidenza. Adatta per la caratterizzazione di piccoli concentratori solari, questa tecnica verrà estesa anche ai grandi sistemi.

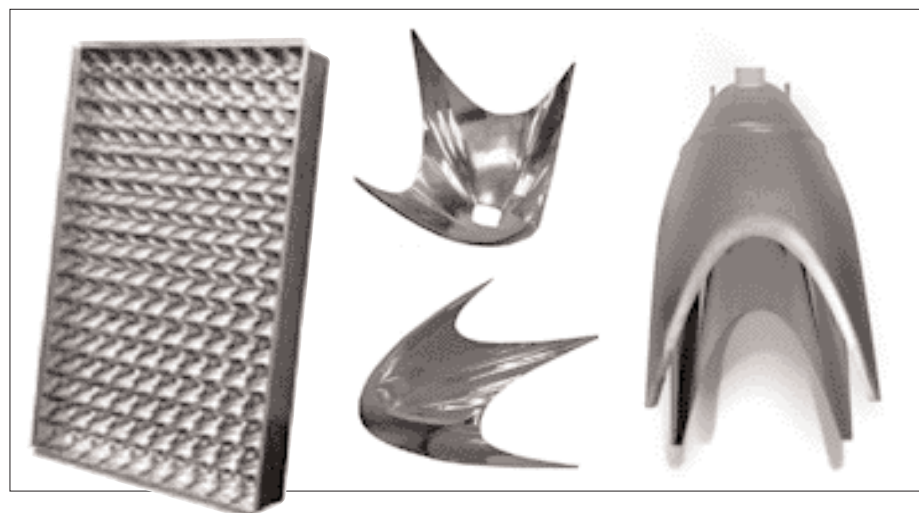
■ ANTONIO PARRETTA\*, ANDREA ANTONINI, EDGAR BONFIGLIOLI, MAURO CAMPA, DONATO VINCENZI E GIULIANO MARTINELLI  
\*ENEA, CPower e Università di Ferrara (parretta@fe.infn.it)

La tecnologia dei sistemi fotovoltaici a concentrazione deve essere affiancata a tecniche di caratterizzazione ottica che qualifichino le proprietà del concentratore in termini di efficienza ottica globale sia in condizioni di perfetto allineamento rispetto al disco solare, sia in funzione dell'entità di un eventuale disallineamento. Quando il sistema a concentrazione è molto complesso, allora si procede a caratterizzare i singoli componenti del sistema, che poi saranno assemblati virtualmente in un progetto simulato al computer per estrarre le prestazioni del sistema nel suo complesso. Ad esempio, il modulo a concentrazione formato dall'assemblaggio di diverse unità ottiche di concentra-

zione, come quello mostrato nella **Figura 1**, richiede che le singole unità ottiche siano caratterizzate in laboratorio dove la luce solare può essere simulata con sorgenti opportune.

In questo articolo illustreremo un metodo di caratterizzazione ottica di piccoli prototipi di concentratori solari che

si è dimostrato estremamente potente per ciò che attiene la conoscenza delle perdite di efficienza per effetto di un disallineamento del concentratore dal disco solare, e lo metteremo a confronto con un metodo tradizionale. Ma prima di illustrare i metodi di caratterizzazione è bene riassumere brevemente alcuni concetti fon-



**Figura 1.** A sinistra, il modulo Cpv Rondine sviluppato da Cpower; al centro e a destra, l'unità ottica di concentrazione Rondine-1 basata sull'ottica NIO (Nonimaging optics), con apertura d'uscita rettangolare.



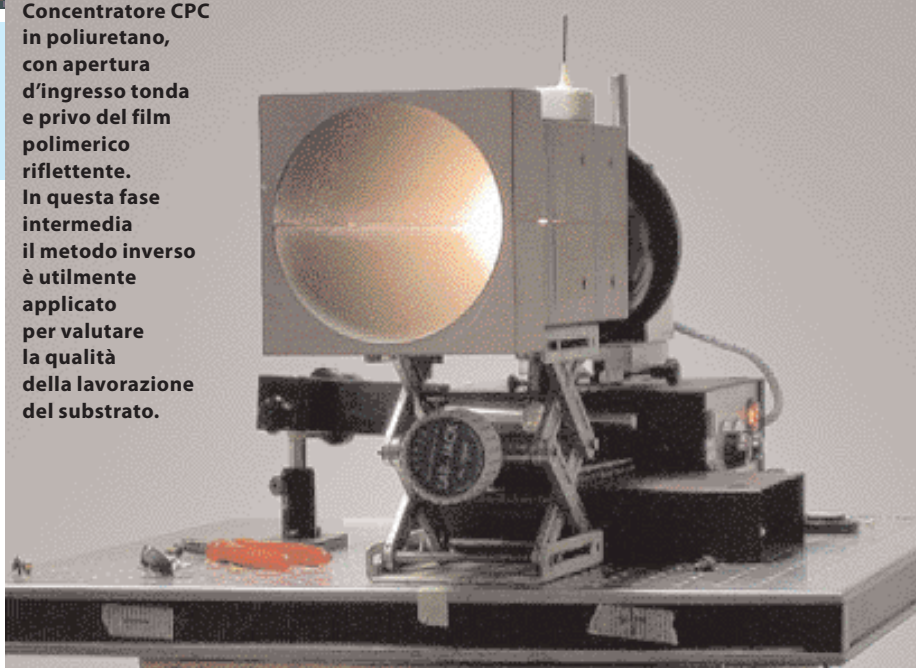
**Il sistema a concentrazione Rondine sviluppato da Cpower.**

damentali che stanno alla base del comportamento di un concentratore solare.

#### IL CONCENTRATORE SOLARE

Un concentratore solare è un dispositivo ottico che lavora prevalentemente sulla radiazione solare diretta convogliando i raggi incidenti su un'area via via più piccola e contemporaneamente aumentando la divergenza angolare  $\theta$ , secondo quanto stabilito dal teorema di Liouville:  $A \cdot \sin^2 \theta = \text{cost}$  (concentratore ideale senza perdite). Esso aumenta perciò la densità del flusso incidente, innalzandola da un valore di circa  $900 \text{ W/m}^2$  (quello che si misura in condizioni di cielo sereno) fino a un valore  $C_{opt}$  volte più grande, dove  $C_{opt}$  è il rapporto di concentrazione ottica, che per un concentratore in aria ha un limite termodinamico di circa 46.000 volte. Per la particolare geometria del sistema Sole-Terra, ovvero per la particolare divergenza dei raggi solari incidenti sulla superficie terrestre, infatti, non è possibile superare questo limite.

**Concentratore CPC in poliuretano, con apertura d'ingresso tonda e privo del film polimerico riflettente. In questa fase intermedia il metodo inverso è utilmente applicato per valutare la qualità della lavorazione del substrato.**

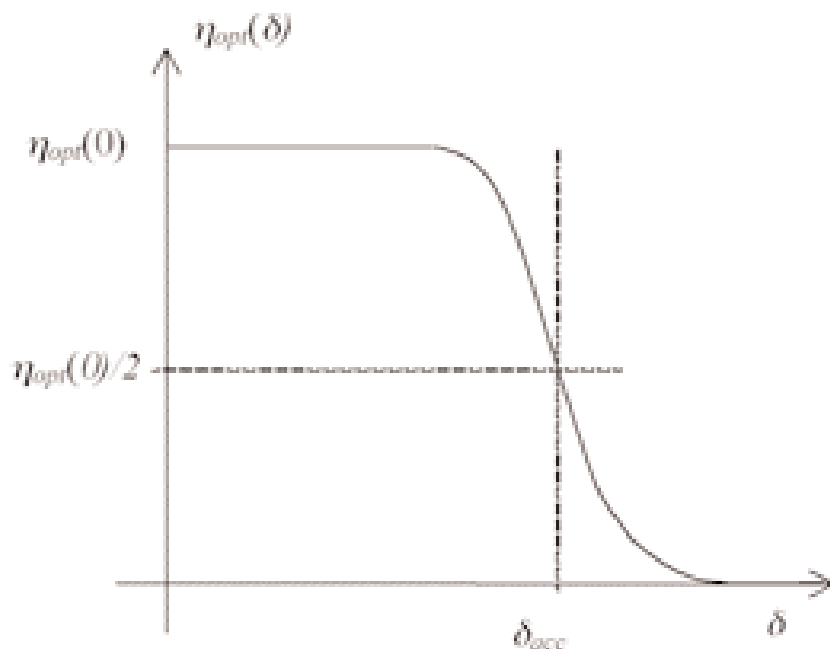


Il processo di concentrazione ottica non avviene con efficienza unitaria, in quanto parte del flusso viene respinto indietro a causa della particolare geometria del concentratore, oppure assorbito dalle sue pareti. L'efficienza ottica  $\eta_{opt}$  è definita quindi come il rapporto tra il flusso (in W) in uscita dal concentratore e il flusso (in W) incidente al suo ingresso. L'ef-

ficienza ottica dipende in maniera sensibile dall'orientazione del concentratore rispetto ai raggi solari incidenti (vedi **Figura 2 a pag. 60**).

I concentratori solari classici, come gli specchi parabolici o le lenti di Fresnel, sono molto sensibili al disallineamento con il Sole, ma l'avvento della NIO (Nonimaging optics o "ottica senza immagine"), →

## Concentrazione fv



**Figura 2.** Tipica curva di efficienza ottica di un concentratore solare NIO. L'angolo di accettazione è qui rappresentato come l'angolo in corrispondenza del 50% dell'efficienza massima.

per opera di R. Winston [1], ha completamente rivoluzionato questo settore, consentendo di realizzare concentratori basati su nuovi concetti (citiamo brevemente il concetto dell'edge ray principle).

Alcuni di questi concentratori sono anche noti come light cones o "coni di luce", da cui derivano i ben noti CPC (Compound parabolic concentrators), e la loro geometria è particolarmente adatta al raggiungimento di elevati rapporti di concentrazione, che sono stati sperimentati fino ai limiti termodinamici. Oltre a ciò, i concentratori della classe NIO hanno la proprietà di essere poco sensibili all'angolo d'incidenza della luce fino a un valore caratteristico chiamato angolo di accettazione,  $\delta_{acc}$  (nelle applicazioni fotovoltaiche si preferisce definire  $\delta_{acc}$  in corrispondenza al 90% dell'efficienza massima), in corrispondenza del quale si registra un calo del 50% rispetto al

### I concentratori della classe NIO sono poco sensibili all'angolo di incidenza della luce

valore per  $\delta = 0$  (vedi **Figura 2**). Questa proprietà ha il grande vantaggio di consentire l'installazione di moduli a concentrazione NIO, come quello della **Figura 1**, su inseguitori solari per moduli fv piani, e quindi di basso costo [2].

#### IL METODO DIRETTO

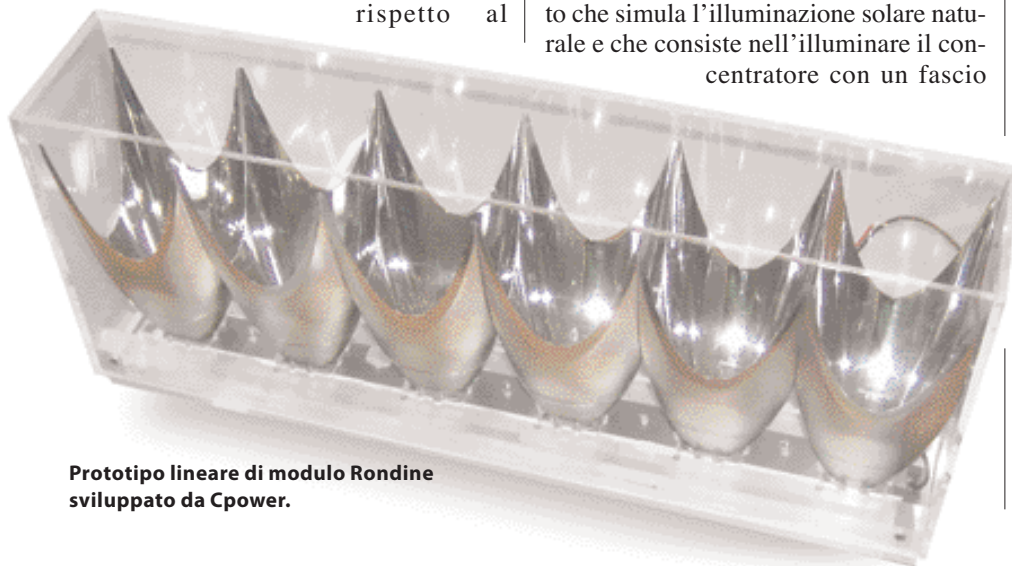
Per tracciare la curva della **Figura 2** si può adottare il cosiddetto metodo diretto che simula l'illuminazione solare naturale e che consiste nell'illuminare il concentratore con un fascio



di luce quasi-collimato, caratterizzato da una divergenza angolare uguale a quella della luce solare diretta ( $\pm 0,27^\circ$ ), uniforme e con una sezione ortogonale superiore all'apertura d'ingresso, e nel misurare il flusso in uscita su un ricevitore (vedi **Figura 3a** a pag. 61).

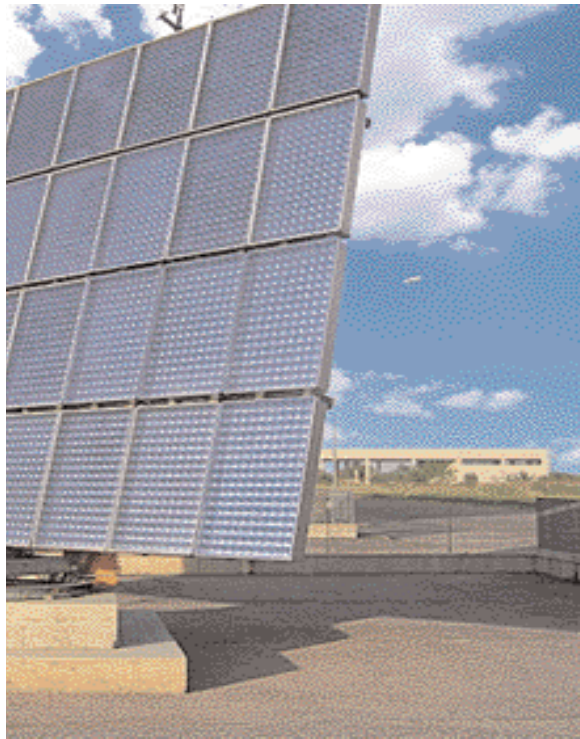
Per preparare il flusso collimato si usa una sfera integratrice (is1) illuminata dalla sorgente (ls) e con la finestra di uscita (w) posta nel fuoco di uno specchio parabolico (pm1) (vedi **Figura 3b**). Il fascio collimato riflesso dallo specchio (pm1) viene poi fatto incidere sul concentratore (cpc), e il flusso di uscita è misurato da una seconda sfera integratrice (is2) accoppiata a un radiometro (ra). Per ottenere una divergenza angolare simile a quella dei raggi solari, è necessario regolare le dimensioni lineari della finestra (w) di (is1) in modo che esse siano in un rapporto 1:100 con la lunghezza focale  $f$  dello specchio parabolico (pm1). Orientando il concentratore rispetto al fascio di luce si ottiene il profilo dell'efficienza ottica relativa all'incidenza di  $0^\circ$ .

L'efficienza assoluta è poi ottenuta misurando il flusso incidente a  $0^\circ$ , che si ottiene togliendo il concentratore (cpc) e rifocalizzando il fascio collimato con un secondo specchio parabolico (pm2) all'interno della sfera integratrice (is2). Questa operazione deve essere eseguita per diversi valori dell'angolo d'incidenza zenitale  $\delta$ , da  $0^\circ$  a valori superiori all'angolo di accettazione. Questo comporta una serie non indifferente di misure. Se poi il concentratore non ha simmetria cilindrica, queste stesse



**Prototipo lineare di modulo Rondine sviluppato da Cpower.**

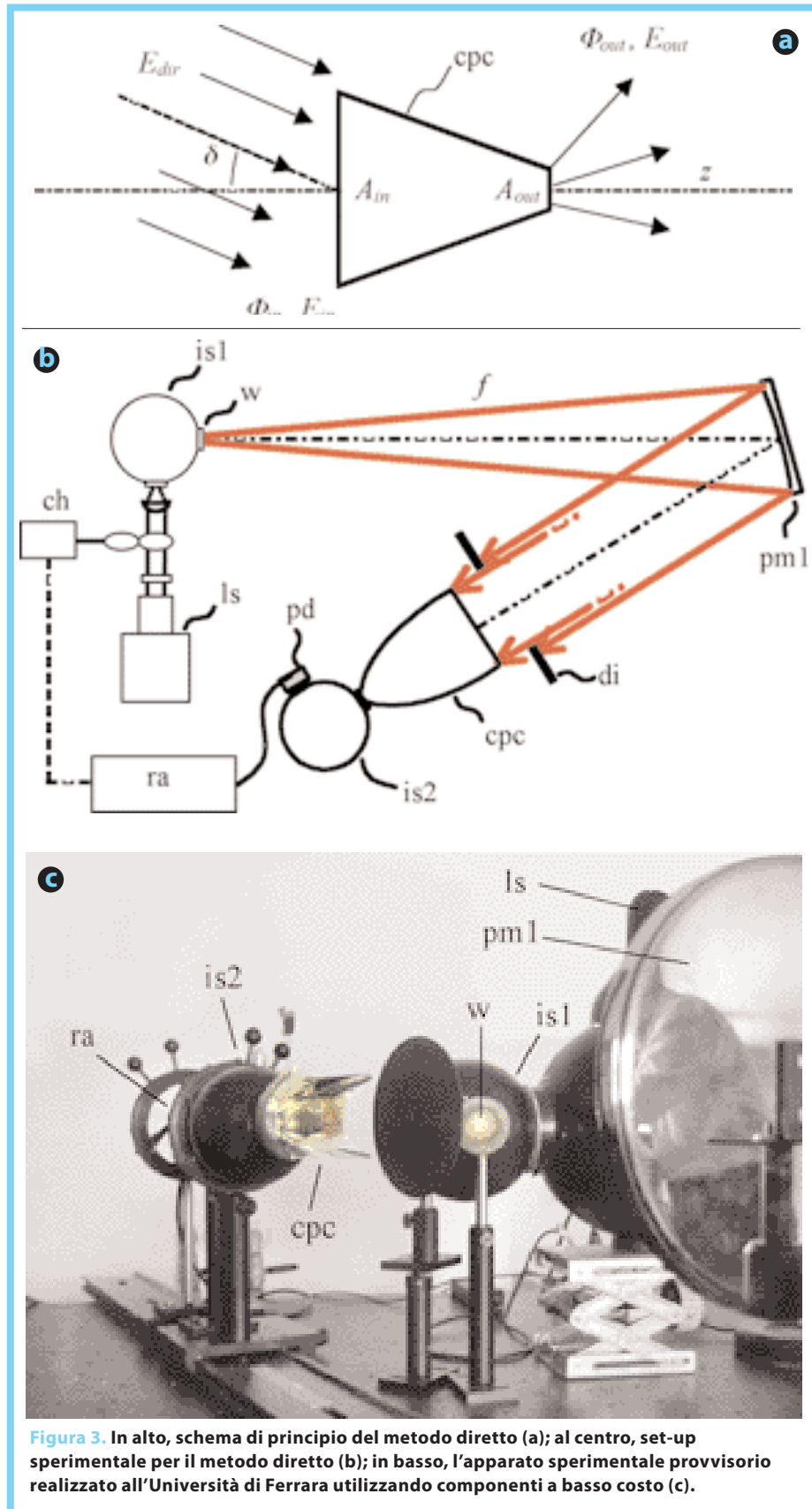




misure devono essere ripetute per un certo numero di angoli d'incidenza azimutali  $\phi$ . Questa situazione si verifica, ad esempio, con i concentratori "Rondine" (vedi **Figura 1** a pag. 58) nei quali la squadratura dell'apertura d'ingresso ha la precisa funzione di consentire un impacchettamento completo delle singole unità ottiche a formare un modulo fotovoltaico a concentrazione. Oltre alla problematicità di effettuare una lunga serie di misure sperimentali, o di simulazioni al computer, il metodo diretto ha l'inconveniente di richiedere un'apparecchiatura più complessa. In particolare, i componenti più costosi e critici sono i due specchi parabolici che debbono essere costruiti con grande precisione, soprattutto il primo, allo scopo di fornire un fascio collimato altamente uniforme su tutta la loro sezione. La **Figura 3c** mostra l'apparato sperimentale provvisorio realizzato all'Università di Ferrara con componenti di basso costo: le sfere integratrici, realizzate partendo da globi in plastica rivestiti di strati di  $\text{BaSO}_4$  (nonostante ciò le loro proprietà ottiche sono perfettamente confrontabili con quelle delle sfere commerciali in alluminio), e gli specchi ingranditori concavi commerciali, che saranno presto sostituiti da specchi parabolici di precisione.

#### IL METODO INVERSO

Con il metodo inverso (vedi **Figura 4** a pag. 62), noto anche come ILLUME (Inverse illumination method), tutto viene semplificato, sia nell'apparato di misura che, soprattutto, sul numero di



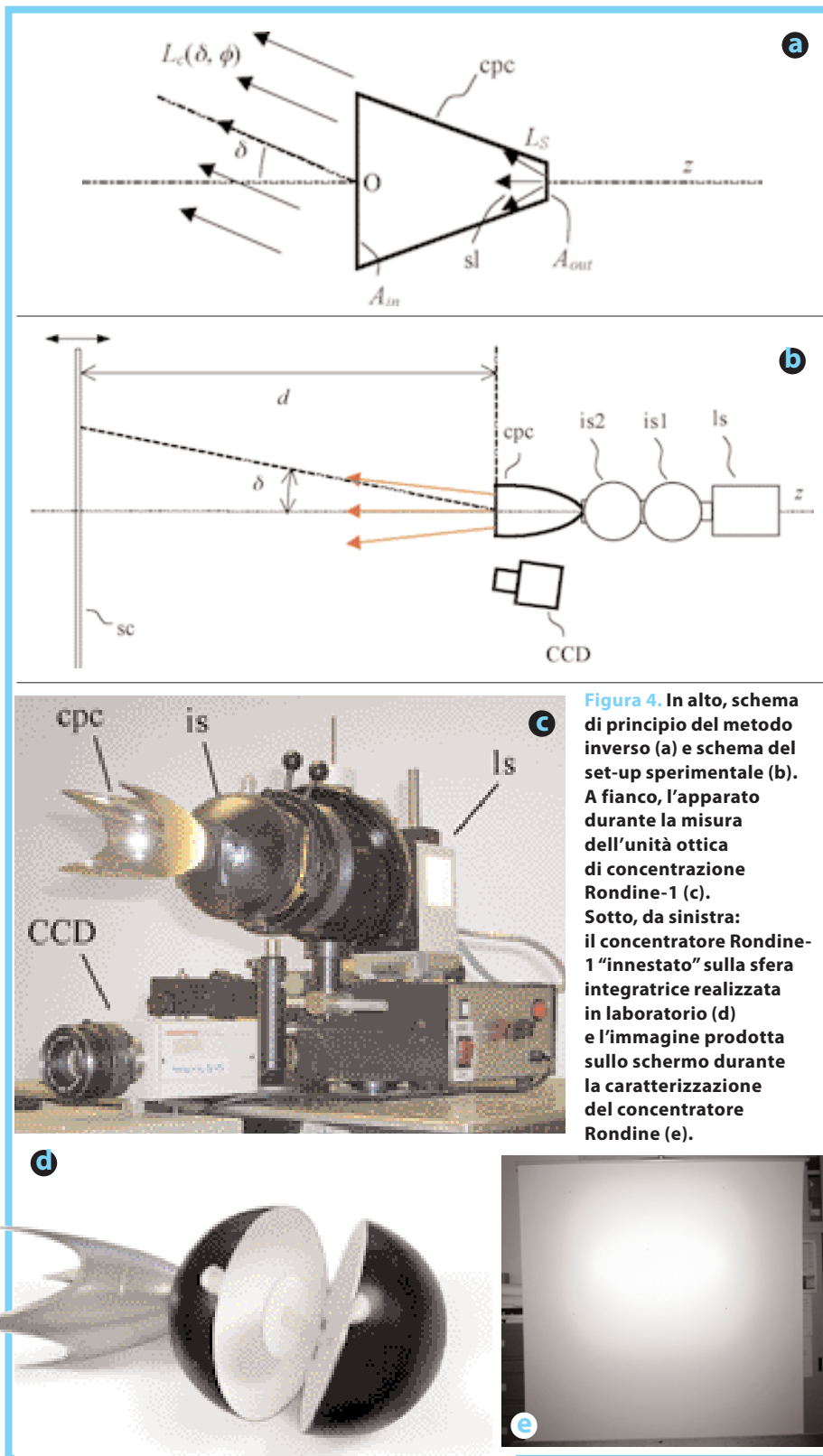
**Figura 3.** In alto, schema di principio del metodo diretto (a); al centro, set-up sperimentale per il metodo diretto (b); in basso, l'apparato sperimentale provvisorio realizzato all'Università di Ferrara utilizzando componenti a basso costo (c).

misure da effettuare [3]. Il metodo consiste nel produrre un fascio lambertiano di luce (sl) di radianza  $L_s$  in corrispondenza dell'apertura di uscita del concentratore, dirigendo il fascio all'interno del concentratore, e nel misurare la radianza angolare  $L_c(\delta, \phi)$  del fascio di luce

uscite dal concentratore dalla parte dell'apertura d'ingresso in funzione delle varie direzioni spaziali, caratterizzate dall'angolo di emissione zenitale  $\delta$  e dall'angolo di emissione azimutale  $\phi$  (vedi **Figura 4a**).

In tal modo il concentratore diventa →

## Concentrazione fv



**Figura 4.** In alto, schema di principio del metodo inverso (a) e schema del set-up sperimentale (b). A fianco, l'apparato durante la misura dell'unità ottica di concentrazione Rondine-1 (c). Sotto, da sinistra: il concentratore Rondine-1 "innestato" sulla sfera integratrice realizzata in laboratorio (d) e l'immagine prodotta sullo schermo durante la caratterizzazione del concentratore Rondine (e).

una sorgente di luce la cui radianza  $L_c(\delta, \phi)$  non sarà più costante perché il concentratore modifica la distribuzione angolare dei raggi della sorgente lambertiana (sl) prima che essi siano emessi dall'apertura d'ingresso.

Ebbene, si dimostra [4] che la radianza angolare del concentratore nel metodo inverso è proporzionale all'efficienza ottica angolare del concentratore nel

metodo diretto, naturalmente quando le due grandezze sono riferite agli stessi angoli, di emissione nel primo caso e d'incidenza nel secondo. In sostanza, la radianza relativa del concentratore ha lo stesso profilo angolare dell'efficienza ottica relativa:

$$L_c^{rel}(\delta, \phi) = \eta_{opt}^{rel}(\delta, \phi)$$

Da un punto di vista sperimentale,

l'apparato per l'uso del metodo inverso richiede pochi e semplici componenti (vedi **Figura 4b**). Si tratta dapprima di preparare una sorgente diffusa lambertiana per illuminare il concentratore dalla parte dell'uscita. A tal fine si può utilizzare una sfera integratrice (is) a sua volta illuminata da una sorgente (ls) (ad esempio una lampada ad arco allo Xenon se si vuole simulare lo spettro solare). Nella **Figura 4b** sono mostrate due sfere integratrici accoppiate per realizzare una migliore sorgente lambertiana. Poi si tratta di proiettare la luce uscente dall'apertura d'ingresso del concentratore (cpc) verso uno schermo piano (sc) posto ad una distanza  $d$  opportuna. Questa distanza dovrà essere sensibilmente superiore alle dimensioni lineari dell'apertura d'ingresso, in modo da avere una risoluzione angolare adeguata per il profilo dell'efficienza angolare. Per un'area d'ingresso  $A_{in}$  la risoluzione angolare su tutti i punti dello schermo risulterà migliore di  $\delta_{max} = \text{tg}^{-1}(\sqrt{A_{in}/2d})$ . Nel caso, ad esempio, del concentratore Rondine-1 della **Figura 1**, in cui l'apertura d'ingresso ha un lato di  $\sim 7$  cm, è necessario portare lo schermo a una distanza di  $\sim 4$  m per avere una risoluzione angolare migliore di  $\sim 0,5^\circ$  su tutti i punti dello schermo. Si tratta infine di registrare, con una macchina fotografica digitale o una videocamera CCD, l'immagine prodotta sullo schermo e di elaborarne l'intensità per estrarre la distribuzione della radianza relativa. Per avere l'effettiva irradianza sullo schermo per prima cosa l'intensità dell'immagine va corretta per gli eventuali effetti di prospettiva, e a tal fine si può applicare un programma da noi già sviluppato [5]. L'irradianza va poi moltiplicata per il fattore  $(\cos\delta)^4$  per ottenere la radianza relativa  $L_c^{rel}(\delta, \phi)$ , equivalente all'efficienza ottica relativa  $\eta_{opt}^{rel}(\delta, \phi)$  [4]. Il fattore  $(\cos\delta)^4$  tiene conto del fatto che lo schermo è una superficie piana, anziché sferica, e i vari punti sullo schermo (sc) non si trovano alla stessa distanza rispetto al centro O dell'apertura d'ingresso, che è il punto dal quale si misurano gli angoli. Ribadiamo qui che la radianza relativa  $L_c^{rel}(\delta, \phi)$  contiene tutte le informazioni relative alle proprietà di raccolta della luce da parte del concentratore in funzione della sua orientazione rispetto al disco solare.

La **Figura 4c** mostra le foto dell'apparato sperimentale, mentre la **Figura 4e** mostra l'immagine prodotta sullo schermo piano durante la caratterizzazione di un concentratore "Rondine". Sullo scher-

mo vengono fissati dei dot neri che costituiscono un sistema di riferimento cartesiano per il calcolo delle distanze lungo gli assi orizzontale e verticale e quindi degli angoli.

Nella **Figura 5** sono riportati i risultati della caratterizzazione del Rondine-1. La **Figura 5a** mostra la mappa tridimensionale dell'intensità, che, sezionata lungo le direzioni  $x/y$ , rispettivamente parallele al lato lungo e al lato corto del profilo rettangolare dell'apertura d'uscita del Rondine-1 (vedi **Figura 1 a pag. 58**), ed elaborata come descritto sopra, fornisce le due curve di radianza relativa (efficienza relativa) rispetto all'angolo di emissione (d'incidenza) zenitale  $\delta$  mostrate nella **Figura 5b**. L'angolo di accettazione fotovoltaico lungo gli assi orizzontale e verticale è rispettivamente di  $6,3^\circ$  e  $4,3^\circ$ , mentre è di  $9,5^\circ$  per entrambi gli assi in corrispondenza del 50% dell'efficienza massima.

Nella **Figura 6** sono riportati, infine, i risultati della caratterizzazione di un secondo concentratore, Rondine-2, più piccolo del Rondine-1 e simmetrico rispetto agli assi  $x/y$ . Le due curve di radianza relativa, o di efficienza ottica relativa, mostrano in effetti che l'angolo di accettazione  $\delta$  lungo i due assi orizzontale e verticale è adesso simile e pari a circa  $5^\circ$ , mentre è di circa  $8^\circ$  per entrambi gli assi in corrispondenza del 50% dell'efficienza massima.

Secondo una teoria in corso di pubblicazione [6], il metodo ILLUME da solo può fornire anche l'efficienza ottica assoluta del concentratore. Ciò richiede la conoscenza ulteriore dell'efficienza ottica assoluta a  $0^\circ$ , da affiancare a quella relativa:

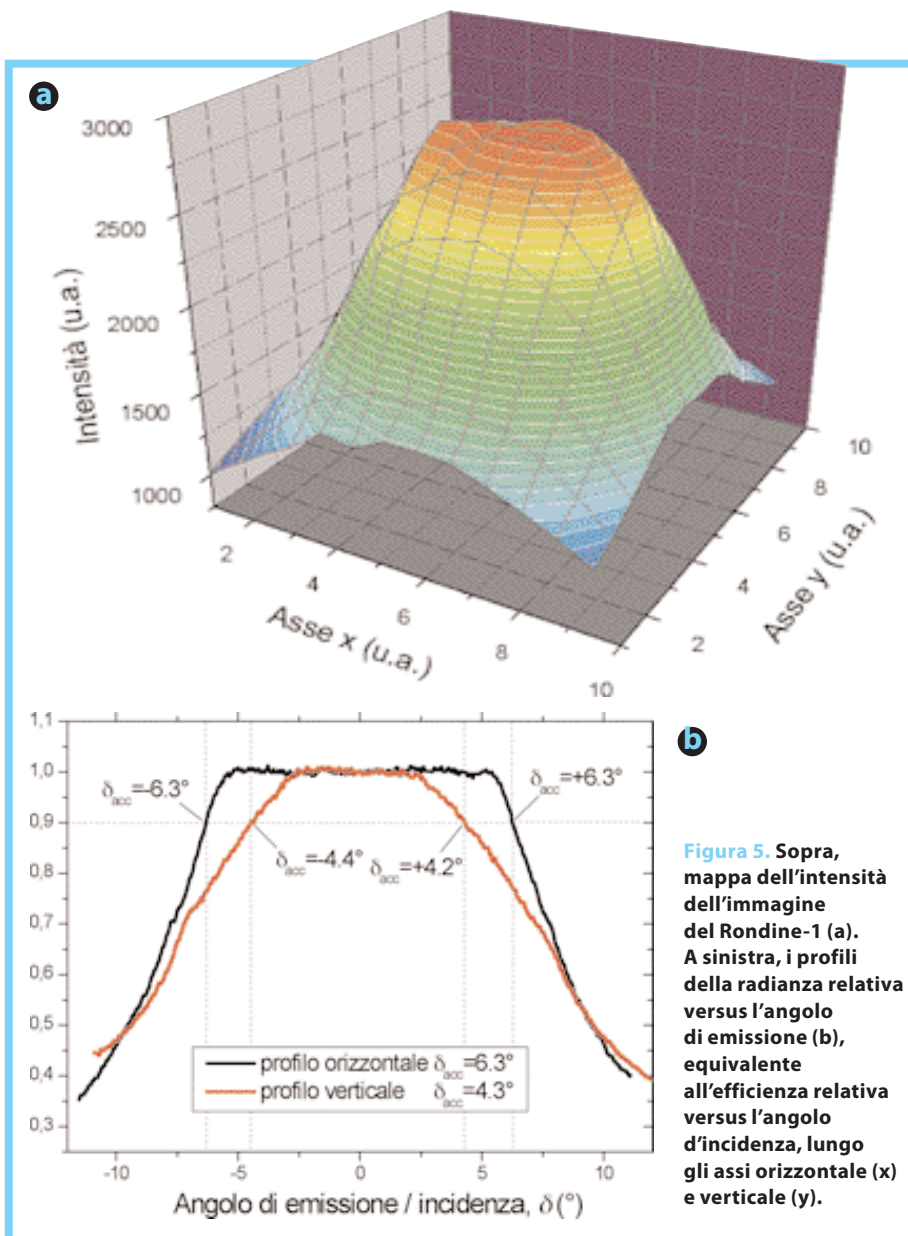
$$\eta_{opt}(\delta, \phi) = \eta_{opt}(0) \cdot \eta_{rel}(\delta, \phi)$$

L'efficienza ottica assoluta a  $0^\circ$  può essere ricavata dall'equazione:

$$\eta_{opt}(0) = \frac{L_c(0)}{L_{RIC}}$$

dove le radianze  $L_c(0)$  e  $L_{RIC}$  si misurano sull'immagine ottenuta orientando la CCD verso l'apertura d'ingresso del concentratore illuminato in modo inverso:  $L_c(0)$  è la radianza media dell'area d'ingresso, mentre  $L_{RIC}$  è la radianza della zona centrale corrispondente al ricevitore (vedi **Figura 7 a pag. 64**).

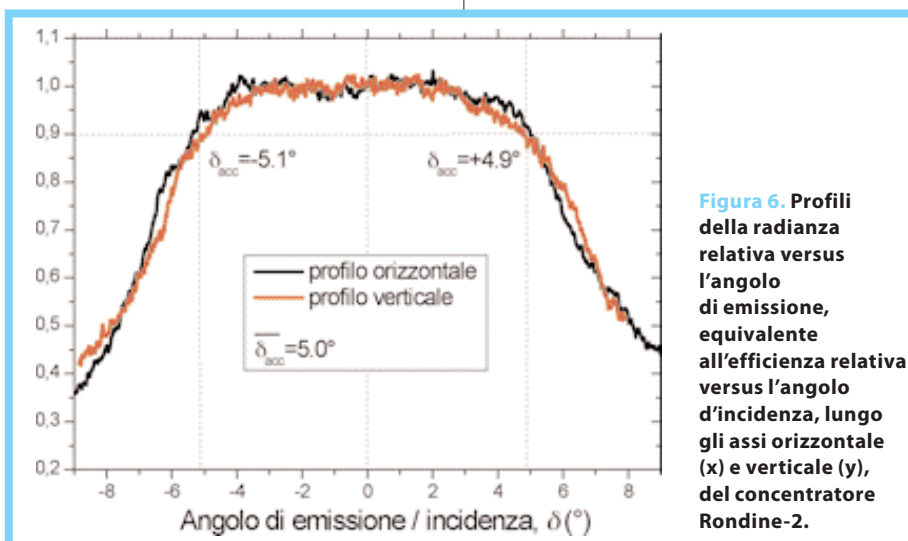
In conclusione, per la caratterizzazione di piccoli prototipi di concentratori solari abbiamo proposto un metodo innovativo, ILLUME, basato sulla registrazione di una singola immagine, quella prodotta su uno schermo piano illuminando il concentratore in senso opposto a quello operativo.



**Figura 5.** Sopra, mappa dell'intensità dell'immagine del Rondine-1 (a). A sinistra, i profili della radianza relativa versus l'angolo di emissione (b), equivalente all'efficienza relativa versus l'angolo d'incidenza, lungo gli assi orizzontale (x) e verticale (y).



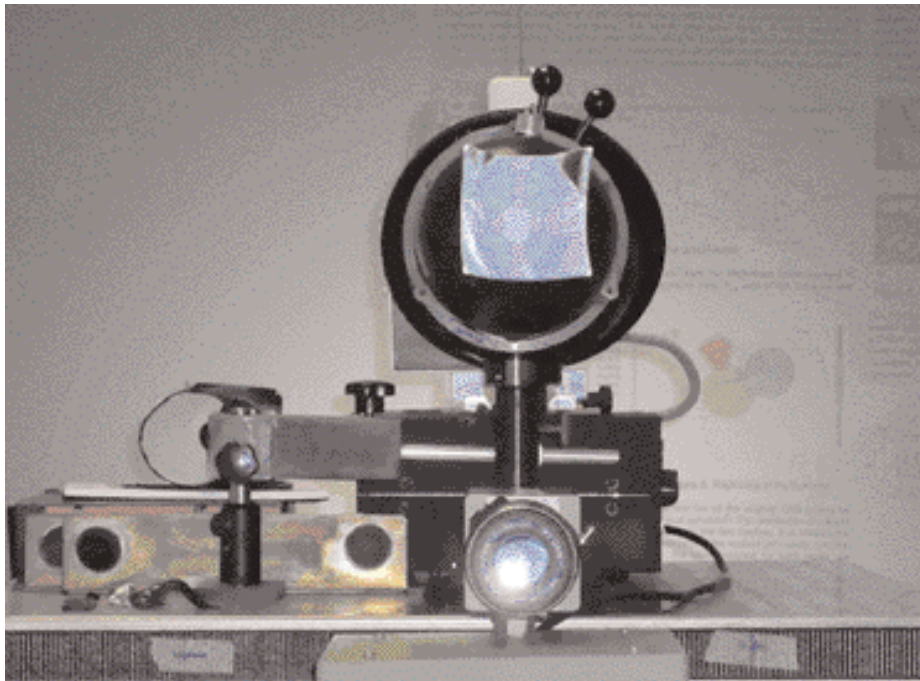
## Il metodo ILLUME permette anche di risalire all'efficienza ottica assoluta del concentratore



**Figura 6.** Profili della radianza relativa versus l'angolo di emissione, equivalente all'efficienza relativa versus l'angolo d'incidenza, lungo gli assi orizzontale (x) e verticale (y), del concentratore Rondine-2.

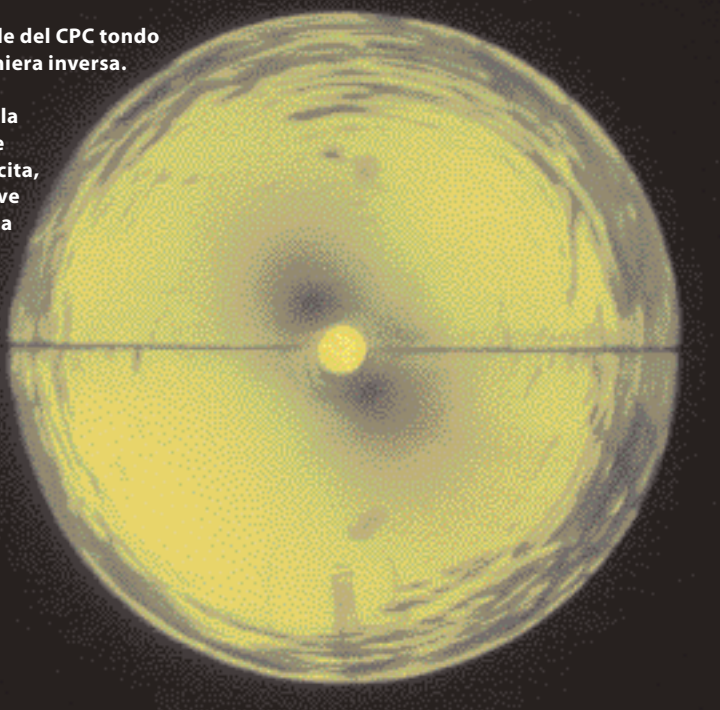


## Concentrazione fv



**Figura 7.** Orientando la camera CCD di fronte al concentratore è possibile misurare la radianza media e la radianza centrale, dalle quali si ricava l'efficienza assoluta a 0°.

Immagine frontale del CPC tondo illuminato in maniera inversa. Il disco centrale rappresenta quella che normalmente è l'apertura di uscita, o il ricevitore, dove è applicata la cella solare. Data l'assenza del film riflettente, la radianza media dell'area d'ingresso  $L_c(0)$  è sensibilmente inferiore a quella del ricevitore  $L_{RIC}$  e quindi l'efficienza ottica  $\eta(0)$  è bassa.



Il grafico a fianco dimostra come l'efficienza ottica relativa derivata dal metodo inverso corrisponda esattamente a quella derivata dal metodo diretto. La prova è stata effettuata per il concentratore CPC tondo.

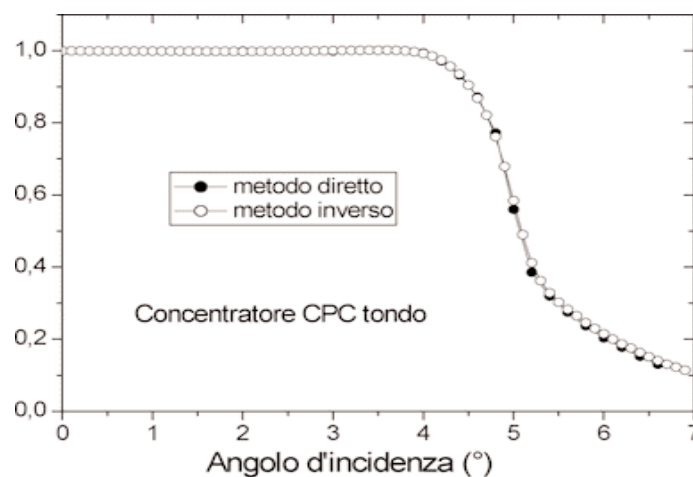


Immagine che da sola contiene tutte le informazioni sulle proprietà angolari relative del concentratore. Da qui la grande potenza del metodo, se confrontato col tradizionale metodo diretto.

Se poi a questa immagine se ne aggiunge una seconda, ottenuta puntando la camera CCD di fronte al concentratore ( $\delta = 0^\circ$ ), si ottengono altre informazioni che permettono di risalire all'efficienza ottica assoluta del concentratore stesso. Le proprietà ottiche del concentratore sono a questo punto completamente svelate grazie a due sole immagini. ■

## BIBLIOGRAFIA

[1] W.T. Welford e R. Winston, *High Collection Nonimaging Optics*, Academic Press, San Diego, 1989.

[2] A. Antonini, M.A. Butturi, P. Di Benedetto, D. Uderzo, P. Zurru, E. Milan, A. Parretta, N. Baggio, *Rondine PV Concentrators: Field Results and Progresses*, 34<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, 7-12 June 2009.

[3] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefanchi, G. Martinelli, M. Armani, *Inverse illumination method for characterization of CPC concentrators*, SPIE Optics and Photonics Conference, San Diego, California (Usa), 26-30 August 2007.

[4] A. Parretta, A. Antonini, E. Milan, M. Stefanchi, G. Martinelli, M. Armani, *Optical efficiency of solar concentrators by a reverse optical path method*, Optics Letters, 33 (2008) 2044-2046.

[5] A. Parretta, C. Privato, G. Nenna, A. Antonini, M. Stefanchi, *Monitoring of concentrated radiation beam for photovoltaic and thermal solar energy conversion applications*, Applied Optics, 45 (2006) 7885-7897.

[6] A. Parretta, in corso di pubblicazione.

[7] E. Bonfiglioli, *Sviluppo di metodi per la caratterizzazione ottica indoor di concentratori solari*, Tesi di Laurea in Fisica e Astrofisica, Università degli Studi di Ferrara, A. A. 2007-2008.

Nel presente lavoro si riconosce il prezioso contributo dato dal dott. E. Bonfiglioli, durante la sua Tesi di Laurea, nella realizzazione degli apparati a sfera integratrice qui riportati [7]. E. Bonfiglioli e M. Campa hanno contribuito, inoltre, alle misure ottiche di laboratorio.