



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FERRARA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN FISICA

**STUDIO DELL'EFFICIENZA OTTICA DI CONCENTRATORI
SOLARI "SENZA IMMAGINE" CON UN METODO DI
ILLUMINAZIONE INVERSA**

Relatori:

Dott. Antonio Parretta

Dott. Andrea Antonini

Controrelatore:

Prof. Ferruccio Petrucci

Laureando:

Dario Roncati

ANNO ACCADEMICO 2006-2007

INDICE:

Introduzione	4
CAPITOLO 1: L'UTILIZZO DEI CONCENTRATORI	5
1.1 Sistemi non-imaging e loro applicazioni	7
1.2 Definizione di rapporto di concentrazione e massimo teorico	8
CAPITOLO 2: RICHIAMI DI OTTICA	12
2.1 Concetti di radiometria	12
2.2 Idee base di ottica geometrica	13
2.2.1 Il raytracing	14
2.2.2 L'étendue o accettazione	17
2.2.3 Il percorso ottico ed il principio di Fermà	19
2.2.4 L'étendue generalizzata o invariante di Lagrange	20
2.2.5 Differenti versioni del rapporto di concentrazione	24
2.3 I limiti dell'ottica di tipo imaging	24
2.3.1 L'aberrazione	25
2.3.2 Il limite di concentrazione	27
2.4 Sorgenti e diffusori lambertiani	29
CAPITOLO 3: OTTICA DI TIPO NONIMAGING	31
3.1 Il principio dell'Edge-Ray o Metodo String	31
3.2 Coni di luce	33
3.3 Il Concentratore Parabolico Composto (CPC)	33
3.4 Proprietà dei CPC	39
3.4.1 L'equazione del CPC	39
3.4.2 La normale alla superficie	40
3.4.3 Curve trasmissione-angolo per i CPC	41
3.5 Coni e paraboloidi come concentratori	42

CAPITOLO 4: CARATTERIZZAZIONE OTTICA DI CONCENTRATORI SOLARI	45
4.1 Caratterizzazione con metodo diretto	45
4.1.1 Metodo diretto con sfera integratrice	45
4.1.2 Metodo diretto a fascio laser	49
4.2 Caratterizzazione con metodo inverso	51
4.2.1 Principi del metodo di illuminazione inversa	51
4.2.2 Teoria del metodo inverso	56
4.3 Studio sulle sorgenti lambertiane	62
4.3.1 La sfera integratrice	64
4.3.2 Vetro e carta traslucidi	71
4.3.3 Vetro, carta traslucidi e sfera integratrice	74
4.3.4 Plastica semitrasparente	74
4.5 Simulazioni con Tracepro	75
4.5.1 Modifiche sfera integratrice	77
4.5.2 Verifica teorica del metodo inverso	80
4.5.3 Influenza sulle misure della distanza dello schermo	90
4.6 Il concentratore “Rondine”	91
CAPITOLO 5: APPLICAZIONE DEL METODO INVERSO	94
5.1 CPC troncato squadrato	94
5.2 Concentratore “Rondine”	97
RIASSUNTO RISULTATI	100
APPENDICE	102
A. Dal CPC troncato al CPC ideale	102
B. Il principio di reversibilità	106
C. Cenni di teoria delle sfere integratrici	110
CONCLUSIONI	116

BIBLIOGRAFIA	118
RINGRAZIAMENTI	121

4.6 Il concentratore “Rondine”

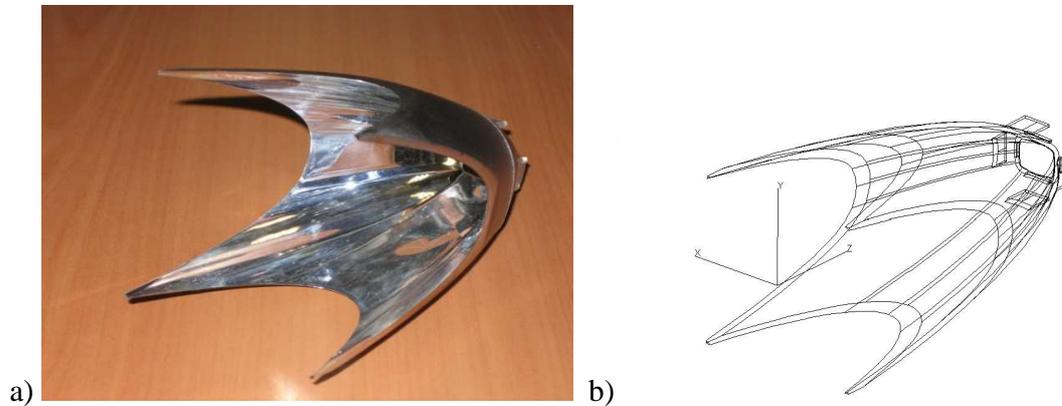


Figura 4.46: a) Concentratore “rondine” e b) suo schema di Tracepro.

Un particolare tipo di concentratore nonimaging che abbiamo caratterizzato e su cui abbiamo applicato il metodo inverso è il cosiddetto “RONDINE”. Il nome deriva dalla sua particolare forma a quattro punte (vedi figura 4.46). Questo concentratore è un’evoluzione del cpc ideale, e deriva da un modello di cpc troncato e squadrato a cui sono state tolte le 4 pareti laterali piane. Questo modello è stato realizzato da CPower®, una società nata come spin-off del dipartimento di Fisica dell’università di Ferrara. La sua particolare forma è nata dalla necessità di inserire la singola unità all’interno di moduli a concentrazione (vedi figura 4.47).

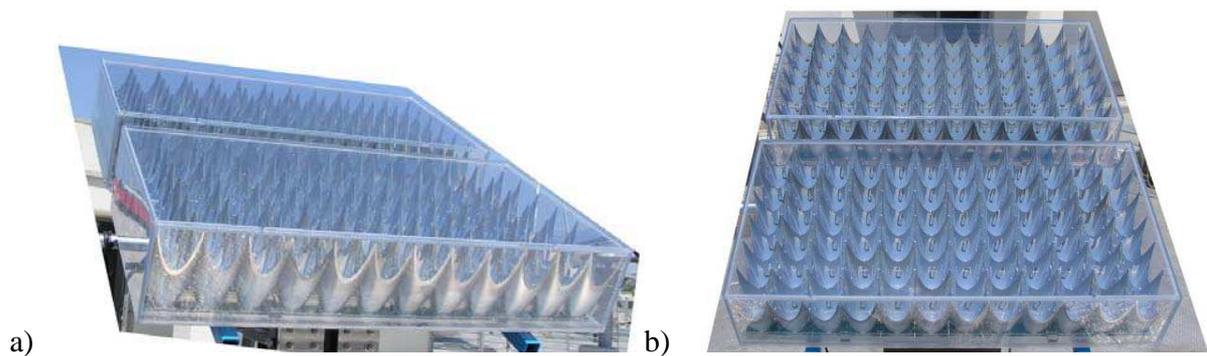


Figura 4.47: Modulo a concentrazione CPower®. L’unità base è costituita dal concentratore “Rondine”.

Vista la particolare forma di questo concentratore, per caratterizzarlo è necessario tracciare più curve Intensità-angolo. Nel nostro caso ci siamo limitati al profilo orizzontale e verticale.

L'apertura d'uscita del rondine è di forma rettangolare, con gli angoli smussati. Nei grafici, ove non diversamente specificato, indicheremo con X l'asse orizzontale, quello parallelo al lato più corto dell'apertura d'uscita, e con Y quello verticale, parallelo al lato lungo, come si vede in figura 4.48.

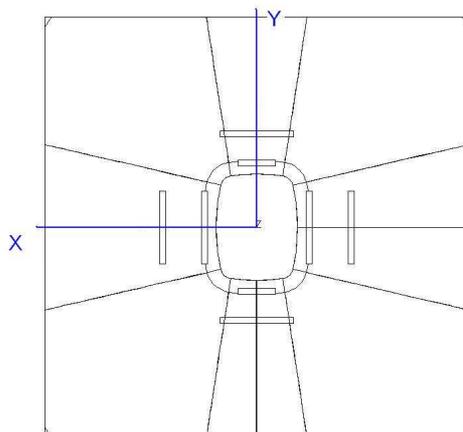


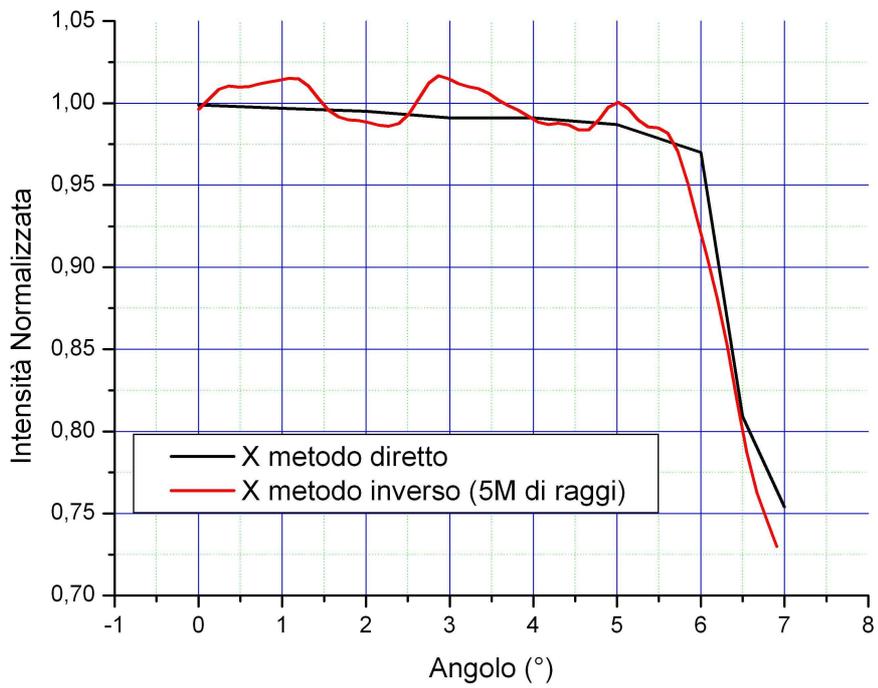
Figura 4.48: Visuale da dietro del concentratore rondine, con l'asse orizzontale (X) e verticale (Y).

In figura 4.49 vediamo i grafici di confronto tra metodo diretto ed inverso simulati con il programma Tracepro per il concentratore "rondine". Come riflettività delle pareti interne abbiamo utilizzato il valore ideale di $R_w = 1$, e come numero di raggi nella simulazione inversa abbiamo usato 5 milioni. Se osserviamo il valore dell'angolo in corrispondenza del 90% d'intensità misurata, notiamo che le due curve differiscono per $0,1^\circ$ (asse X) e $0,1^\circ$ (asse Y) e che gli andamenti coincidono.

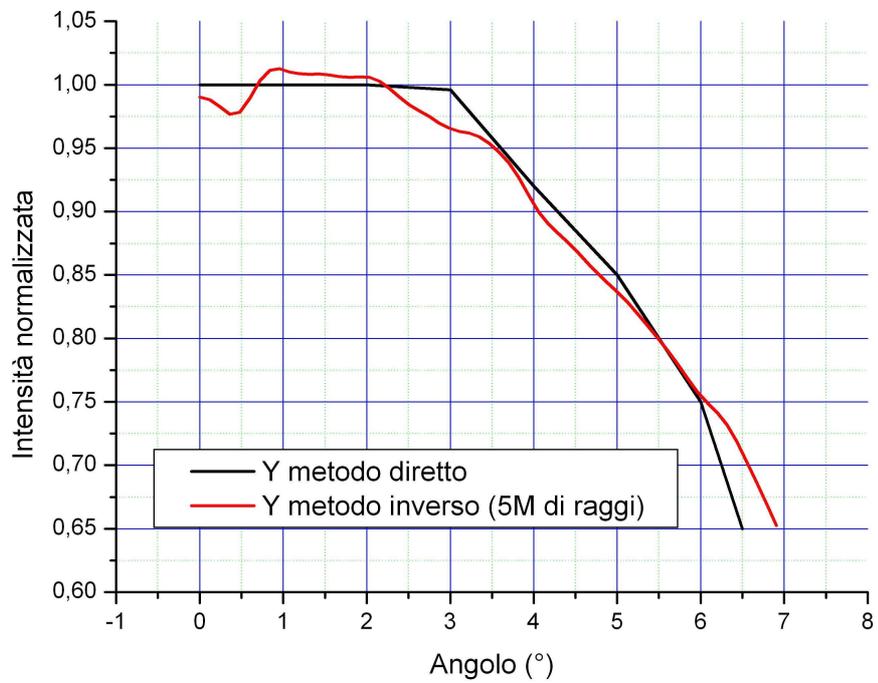
La curva del metodo inverso ha alcune fluttuazioni a bassi angoli, eliminabili utilizzando più raggi nella simulazione. La tabella 3 riassume i valori trovati per l'angolo d'accettazione. [13]

θ_{acc} ($^\circ$)	Asse Orizzontale (X)	Asse verticale (Y)
Metodo Diretto	6,2	4,2
Metodo Inverso	6,1	4,1
$\Delta\theta$	0,1	0,1

Tabella 3: Angoli d'accettazione θ_{acc} del concentratore "rondine" ottenuti dalla simulazione al computer utilizzando il metodo diretto ed inverso, e loro scarto, per $R_w = 1$.



a)



b)

Figura 4.49: Confronto simulato al computer tra metodo diretto ed inverso applicati al concentratore “rondine”.

CAPITOLO 5: APPLICAZIONE DEL METODO INVERSO

Abbiamo visto nei capitoli precedenti come il metodo inverso applicato alle simulazioni col calcolatore dia ottimi risultati se confrontato con le simulazioni del metodo diretto; questo lo abbiamo verificato per vari modelli di cpc, per il concentratore a rondine e per la lente di Fresnel. L'ultimo passo consiste nell'applicare in laboratorio questo metodo e poi confrontarlo con i dati simulati al computer. Avevamo a nostra disposizione due concentratori: un cpc troncato squadrato ed un concentratore "rondine", entrambi già trattati dal punto di vista teorico nei precedenti capitoli.

5.1 CPC troncato squadrato

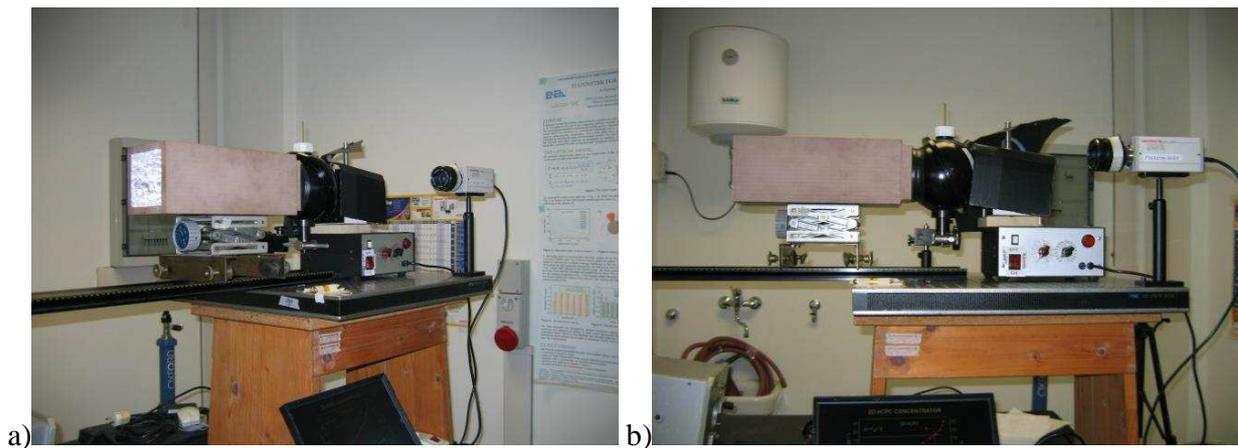


Figura 5.1: Apparato di misura del metodo inverso applicato al cpc troncato squadrato.

Di questo cpc è già stata fatta un'analisi sperimentale con il metodo inverso in un precedente lavoro di tesi [4]. Di questo lavoro ne abbiamo accennato al paragrafo 4.1.2. In quel caso come sorgente lambertiana era stato usato il diffusore descritto al paragrafo 4.3.4. Come si vede dalla figura 4.26 questo diffusore non soddisfa appieno i requisiti del metodo inverso, questo infatti è una delle cause di disaccordo tra i dati ottenuti in quel lavoro (vedi figura 4.4). Abbiamo ripetuto quella misura sperimentale utilizzando questa volta come sorgente lambertiana una sfera integratrice. Per tutti i dettagli sulla sfera e sulle sue caratteristiche vi rimandiamo al paragrafo 4.3.1. L'apparato strumentale è quello di figura 5.1. Una lampada alogena da 150 watt e 24 Volt illumina l'ingresso (B3 di figura 4.13.2) della sfera, all'uscita A1 di figura 4.13.2 della sfera è

stato posizionato il retro del cpc, sostenuto da un supporto ad altezza regolabile. Per la precisione, l'uscita della sfera si trova dove usualmente è posizionata la cella pv. Davanti al cpc (dalla parte opposta della sfera) alla distanza di 390 cm è posizionato uno schermo bianco, di lato 176 cm, perpendicolare all'asse del cpc e di fianco al cpc è posta una ccd collegata ad un computer. La misura si effettua in modo molto semplice e veloce: si mette la stanza al buio, si accende la lampada e si scatta una foto dello schermo illuminato con la ccd. Fatto questo si elabora la foto con un programma apposito (nel nostro caso abbiamo usato il programma in dotazione con la ccd Hamamatsu: HiPic), tracciando il profilo d'intensità lungo l'asse orizzontale. La curva intensità-angolo ottenuta la si confronta con quella ottenuta dalla simulazione al pc effettuata col programma Tracepro. In figura 5.2 possiamo vedere a sinistra l'immagine che forma la luce in uscita dal cpc sullo schermo in laboratorio e a destra la stessa immagine simulata dal computer. Da notare lo stesso spot luminoso al centro. Anche il contorno di luce più esteso ha la stessa forma. Ovviamente l'immagine simulata ha risoluzione minore e questo comporta una graduazione di toni di grigio più marcata.

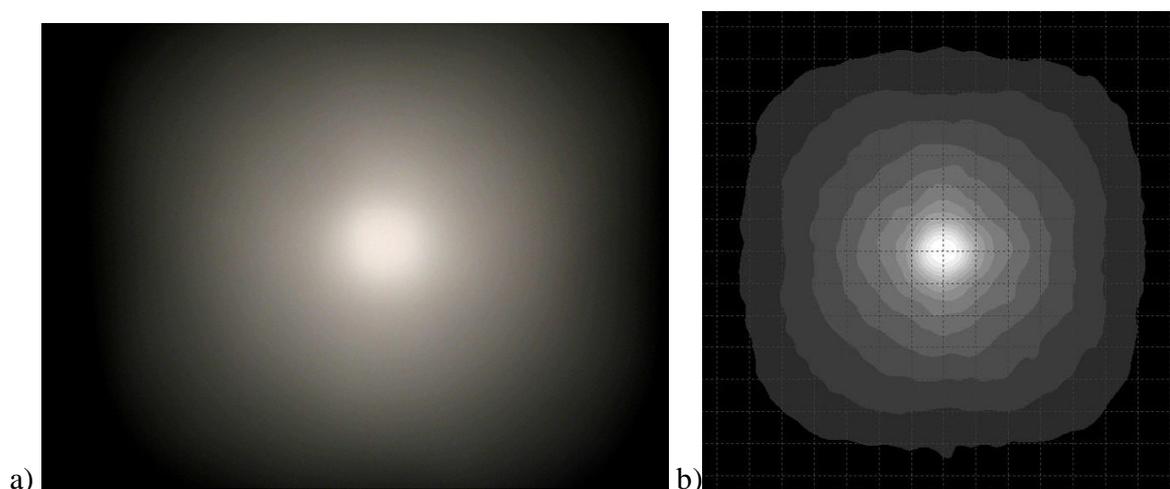


Figura 5.2: a) Schermo illuminato dalla luce in uscita dal cpc illuminato in modo inverso. b) Stessa immagine ma ottenuta dalla simulazione al computer con 2 milioni di raggi.

Dalle due immagini di figura 5.2 si è ricavato, nel caso dell'immagine dello schermo con il programma HiPic e nel caso della simulazione con lo stesso Tracepro, la matrice dati, un file di testo con una serie di valori ordinati per posizione corrispondenti all'intensità luminosa. Da queste due matrici, con un programma di elaborazione dati come Origin, Excel o simili, abbiamo ricavato il profilo orizzontale e verticale Intensità-angolo di figura 5.3. In corrispondenza del

valore 0,9 di intensità normalizzata abbiamo l'angolo d'accettazione, $\theta_{acc}(90\%)$. Con la misura simulata abbiamo ottenuto $\theta_{acc} = 0,8^\circ$; con la misura sperimentale, $\theta_{acc} = 0,8^\circ$. Fino a $0,9^\circ$ le due curve combaciano, oltre i $0,9^\circ$ si ha un distacco crescente dovuto alla diversa pendenza delle curve. Questa discrepanza nei dati si ritiene dovuta ad un difetto di produzione del cpc: la parte delle pareti interne che si trova vicino all'ingresso del cpc è stata troppo levigata; questo ha portato ad una differenza tra il modello cad usato nelle simulazioni ed il cpc reale. Inoltre il rivestimento riflettivo interno presenta vari macro difetti (bolle, sovrapposizione di strati).

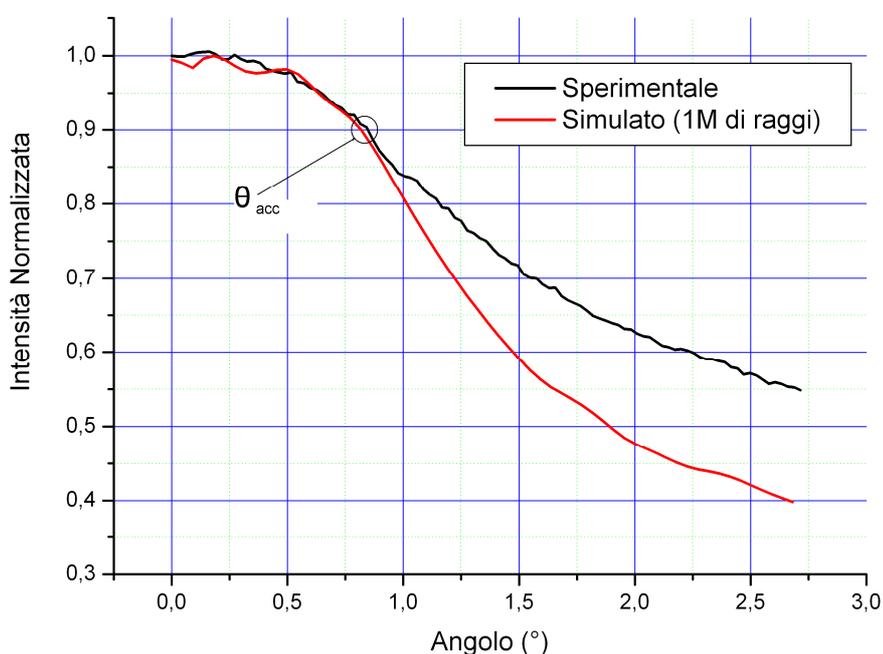


Figura 5.3: Confronto tra la curva sperimentale e quella simulata, ottenute con il metodo inverso per il cpc troncato, squadrato.

5.2 Concentratore “Rondine”

Caratterizzare interamente il modello rondine, definire la sua efficienza ed il suo angolo d'accettazione richiederebbe con i metodi tradizionali molto tempo, in quanto bisognerebbe fare delle misure lungo più direzioni (quando invece per oggetti a simmetria circolare ne è sufficiente una). E' proprio in questo caso che si vede la funzionalità del metodo inverso, con il quale è sufficiente un'unica misura per una caratterizzazione completa. Abbiamo perciò voluto verificare

il metodo in laboratorio, proprio su questo concentratore così particolare. L'apparato di misura come si vede dalla figura 5.4 è lo stesso del paragrafo 5.1, con la sola differenza che ora al posto del cpc abbiamo posizionato il Rondine, con il retro posto contro la bocca d'uscita (A1) della sfera.

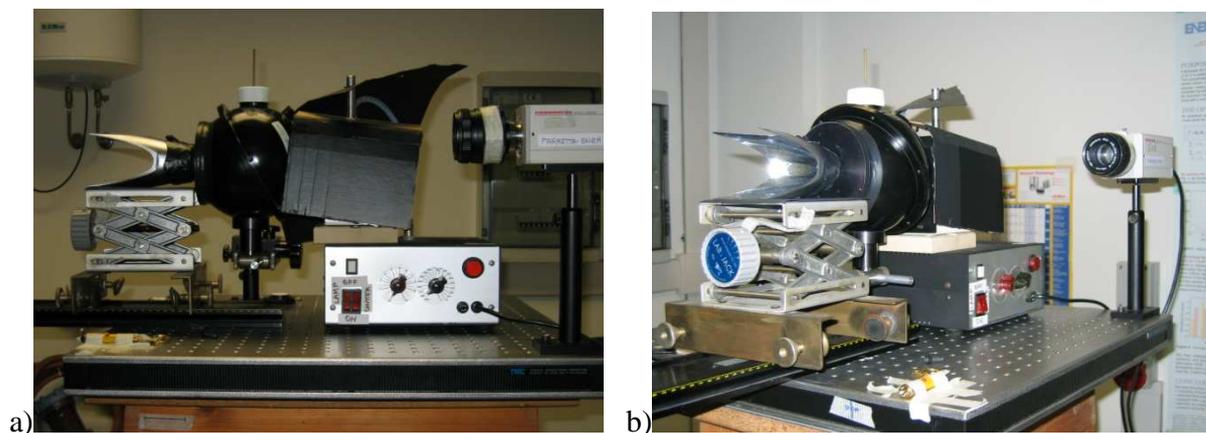


Figura 5.4: Apparato di misura del metodo inverso applicato al concentratore “Rondine”.

Essendo l'uscita del rondine più piccola di quella della sfera, l'abbiamo avvolta con della carta assorbente nera, per evitare dispersioni di luce. Nella figura 5.5 abbiamo a sinistra l'immagine ottenuta sullo schermo in laboratorio, formata dalla luce in uscita dal rondine ed a destra la stessa immagine ottenuta dalla simulazione al computer (gli assi sono invertiti rispetto alla figura 4.48).

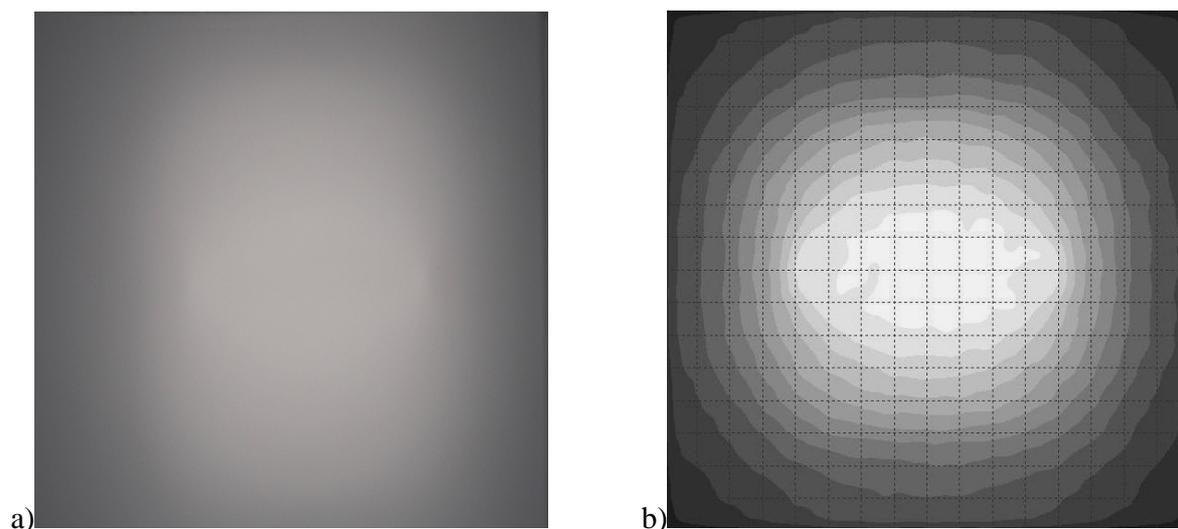
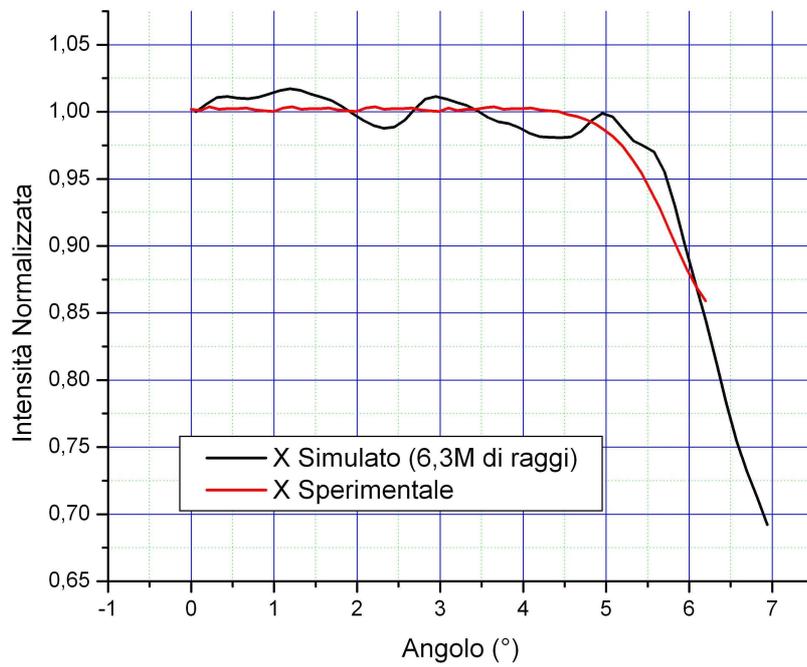
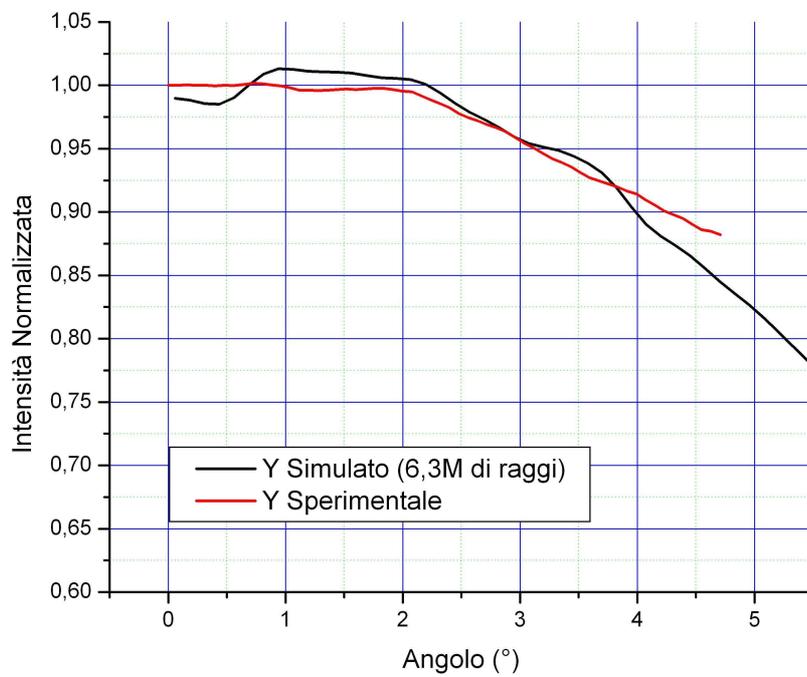


Figura 5.5: a) Schermo illuminato dalla luce in uscita dal concentratore “rondine” con metodo inverso. b) Stessa immagine ma ottenuta dalla simulazione al computer con 2 milioni di raggi.



a)



b)

Figura 5.6: Curve Intensità-angolo sperimentale (rossa) e simulata al pc (nera) del concentratore “rondine”. a) asse orizzontale e b) verticale.

Da notare lo stesso profilo centrale allungato in orizzontale e quello più esteso leggermente allungato verticalmente. Dalle due immagini di figura 5.5 abbiamo ricavato il profilo orizzontale e verticale con la procedura descritta al paragrafo 5.1 e li abbiamo messi a confronto. Le curve ottenute sono mostrate in figura 5.6. Notiamo innanzitutto che le due curve, sperimentale e simulata, sono consistenti, sia lungo il profilo X che Y. Come riflettività delle pareti, nella simulazione, abbiamo utilizzato il dato fornito dal costruttore, di $R_w = 0,84$. La curva simulata presenta alcune oscillazioni nonostante sia stata ricavata utilizzando oltre sei milioni di raggi e questo può portare ad un errore nel calcolo dell'angolo d'accettazione θ_{acc} di qualche decimo di grado, il quale è però di un ordine di grandezza inferiore al valore atteso, e quindi accettabile. La tabella 4 mostra i valori di θ_{acc} ottenuti dalle curve. Gli angoli della misura simulata sono inferiori rispetto a quelli di tabella 3, ma questo è giustificato dall'aver utilizzato una riflettività di parete non ideale, quindi inferiore. Abbiamo quindi un'ulteriore conferma della validità del metodo inverso.

θ_{acc} (°)	Asse Orizzontale (X)	Asse Verticale (Y)
Misura Simulata	6,1	4
Misura Sperimentale	5,9	4,3
$\Delta\theta$	0,2	0,3

Tabella 4: Angoli d'accettazione θ_{acc} del concentratore "rondine" ottenuti dalla simulazione al computer e dalla misura in laboratorio, con il metodo inverso, per $R_w = 0,84$.

RIASSUNTO RISULTATI

Per concludere riportiamo in tabella 5 i valori di angolo d'accettazione al 90% d'efficienza ed in tabella 6 quelli al 50% d'efficienza, ottenuti in tutte le misure sperimentali e simulate effettuate in questo lavoro di tesi. Le differenze sono di pochi decimi di grado, tranne nel caso del CPC-SQ dove l'errore al 50% d'efficienza è di 1°, dovuto ad una differenza tra modello CAD delle simulazioni e modello reale. Questo è un ottimo risultato che avvalorata il metodo di caratterizzazione qui studiato.

Angoli al 90% d'efficienza		CPC	T-CPC	CPC-SQ*	Rondine		Lente di Fresnel	
					xz	yz	Circolare	Squadrata
Dir	Sim	1.3°	1.3°	1.5°	6.2°	4.2°	0.7°	1.0°
Inv	Sim	1.25°	1.2°	1.4° / 0.8°	6.1°	4.1°	0.7°	0.9°
	Spe		1.4°	0.8°	5.9°	4.3°		

Tabella 5: Angoli d'accettazione per alcuni modelli di concentratori solari analizzati con il metodo diretto ed inverso. Gli angoli d'accettazione si riferiscono al 90% d'efficienza.

Angoli al 50% d'efficienza		CPC	T-CPC	CPC-SQ*	Rondine		Lente di Fresnel	
					xz	yz	Circolare	Squadrata
Dir	Sim	1.4°	2.0°	2.3°			1.3°	1.5°
Inv	Sim	1.4°	2.0°	2.3° / 2.1°			1.3°	1.5°
	Spe			3.0°				

Tabella 6: Angoli d'accettazione per alcuni modelli di concentratori solari analizzati con il metodo diretto ed inverso. Gli angoli d'accettazione si riferiscono al 90% d'efficienza.

* I due valori diversi riportati per il CPC-SQ sono dovuti a due differenti distanze dello schermo. Nel confronto simulato metodo diretto-inverso abbiamo posto lo schermo ad una distanza ideale di 100 metri, mentre nel confronto del metodo inverso tra misura simulata e sperimentale lo schermo era a 3,8 metri, distanza massima del laboratorio. I due confronti hanno portato dati

consistenti tra loro a riprova della funzionalità del metodo. Ovviamente il valore di θ_{acc} che più si avvicina a quello reale è quello trovato con lo schermo distante.

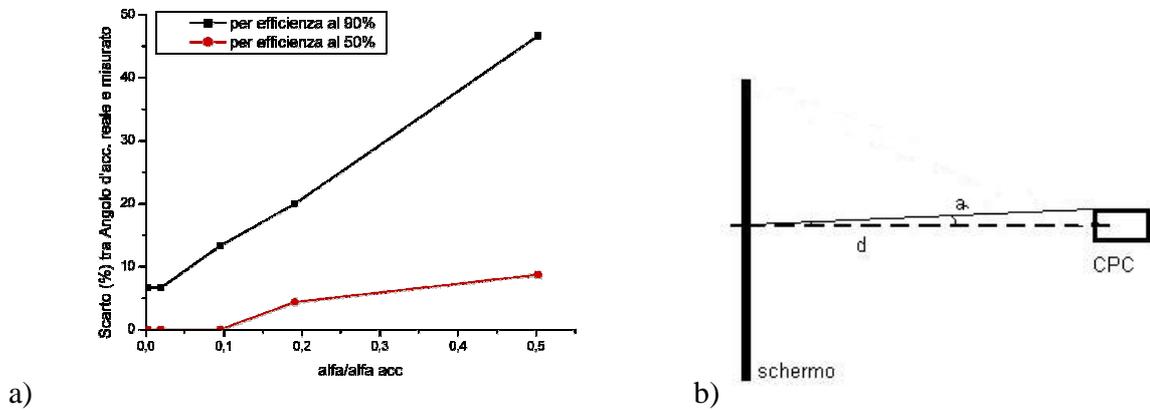


Figura D1: a) Curve Scarto-errore schermo per il CPC-SQ. In ascissa abbiamo il rapporto tra l'angolo alfa, visibile nell'immagine (b) e l'angolo d'accettazione nominale del concentratore. L'angolo alfa è l'errore angolare massimo che si commette nel calcolare la curva efficienza-angolo, con lo schermo posto a distanza d . In ordinata del grafico (a) abbiamo lo scarto % tra l'angolo d'accettazione vero e quello misurato. La curva nera è riferita all'angolo d'accettazione al 90% d'efficienza, quella rossa al 50% d'efficienza.

Dall'analisi simulata fatta per il CPC-SQ abbiamo ricavato la curva di figura D1a. Da questo grafico deduciamo che nel caso del CPC-SQ per avere un valore dell'angolo d'accettazione al 90% d'efficienza affidabile, con un'errore inferiore al dieci percento, bisogna porre lo schermo ad una distanza di almeno 50 metri dal concentratore ($\alpha/\alpha_{acc} \leq 0,02$). Per l'angolo d'accettazione al 50% d'efficienza invece sono già sufficienti 10 metri ($\alpha/\alpha_{acc} \leq 0,02$).

APPENDICE

A. Dal CPC troncato al CPC ideale

Siamo partiti da un CPC circolare troncato con le seguenti caratteristiche:

Raggio superficie d'uscita = (Lateral focal shift) = $a = 5 \text{ mm}$

Lunghezza = (Front Length) = $L = 350 \text{ mm}$

Per definire in TracePro un CPC ideale servono:

- Front length, L
- Lateral focal shift, a
- Axis tilt (angolo d'accettazione), θ
- Focal, f

Sono note le seguenti equazioni:

$$f = a(1 + \sin \theta); \quad L = f \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta}$$

Ma del cpc ideale da ricavare conosciamo solo il raggio del foro d'uscita che è sempre $a = 5 \text{ mm}$.

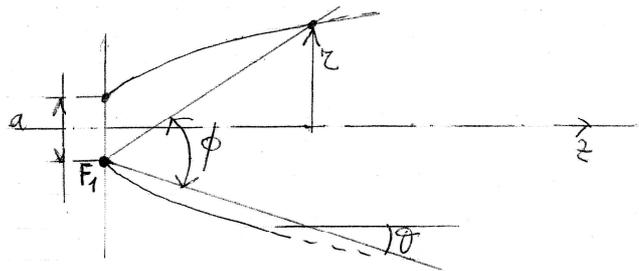


Figura A1: Schizzo di un cpc

Riferendoci alla figura A1 utilizziamo le equazioni parametriche del cpc:

$$r = \frac{2f \sin(\phi - \theta)}{1 - \cos \phi} - a; \quad z = \frac{2f \cos(\phi - \theta)}{1 - \cos \phi} - a \quad (\text{A.1})$$

Per $\phi = 2\theta$ abbiamo $r = a$ da cui

$$r = \frac{2f \sin \theta}{1 - \cos(2\theta)} - a = \frac{2f \sin \theta}{1 - \cos^2 \theta - \sin^2 \theta} - a \quad (\text{A.2})$$

$$r = \frac{f}{\sin \theta} - a \Rightarrow a' = \frac{f}{\sin \theta} - a \quad (\text{A.3})$$

con

$$a' = \frac{a}{\sin \theta} \quad (\text{A.4})$$

$$a' \sin \theta = f - a \sin \theta \quad (\text{A.5})$$

$$a = f - a \sin \theta \rightarrow f = a(1 + \sin \theta) \quad (\text{A.6})$$

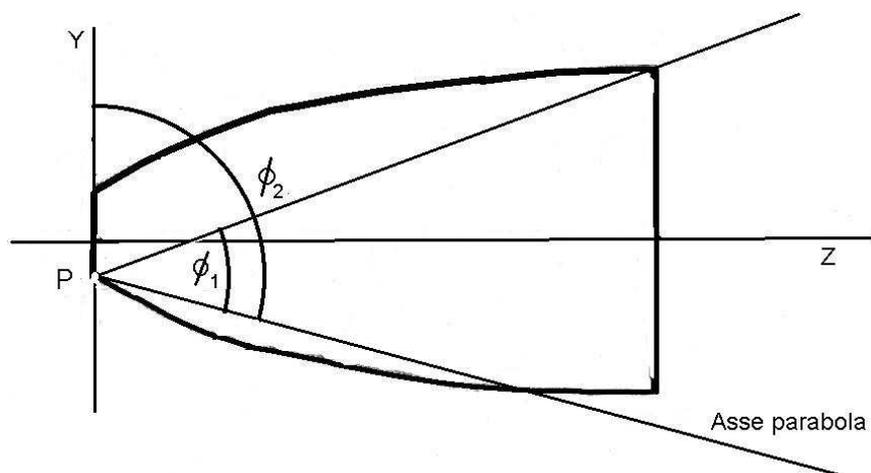


Figura A2: Sezione di un cpc

Per il T-CPC abbiamo due punti dove conosciamo r e z :

- $r = a' = 7,13 \text{ mm}$; $z = L = 350 \text{ mm}$
- $r = a = 5 \text{ mm}$; $z = 0$

Calcolando le equazioni (A.1) nei due punti noti, abbiamo un sistema con incognite f e θ , inoltre

$$\phi_1 = \theta + \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{a'_{t-cpc} + a}{L_{t-cpc}} \right) \quad (\text{A.7})$$

$$\phi_2 = \theta + \frac{\pi}{2} \quad (\text{A.8})$$

e quindi

$$r(\phi_1) = a'_{T-CPC} = \frac{2f \sin(\phi_1 - \theta)}{1 - \cos \phi_1} - a \quad (\text{A.9})$$

$$r(\phi_2) = a = \frac{2f \sin(\phi_2 - \theta)}{1 - \cos \phi_2} - a' = \frac{2f}{1 - \cos \phi_2} - a \quad (\text{A.10})$$

$$a'_{T-CPC} + a = \frac{2f \sin(\phi_1 - \theta)}{1 - \cos \phi_1} \quad (\text{A.11})$$

$$2a = \frac{2f}{1 - \cos \phi_2}; \quad a = \frac{f}{1 - \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right)} = \frac{f}{1 + \sin \theta} \quad (\text{A.12})$$

$$a'_{T-CPC} + a = \frac{2f \sin \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{a'_{T-CPC} + a}{L_{T-CPC}} \right) \right]}{1 - \cos \left[\theta + \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{a'_{T-CPC} + a}{L_{T-CPC}} \right) \right]} \quad (\text{A.13})$$

$$a = \frac{f}{1 + \sin \theta} \quad (\text{A.14})$$

Le equazioni (A.13) e (A.14) sono sufficienti per trovare f e θ , metto la (A.14) nella (A.13):

$$a'_{T-CPC} + a = \frac{2a(1 + \sin \theta) \sin \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{a'_{T-CPC} + a}{L_{T-CPC}} \right) \right]}{1 - \cos \left[\theta + \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{a'_{T-CPC} + a}{L_{T-CPC}} \right) \right]} \quad (\text{A.15})$$

Risolviamo la (A.15) numericamente sostituendo i seguenti valori:

$$\begin{aligned} \frac{a'_{T-CPC} + a}{L_{T-CPC}} &= 0,218 \\ \sin \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{a'_{T-CPC} + a}{L_{T-CPC}} \right) \right] &= 0,21313 \quad \rightarrow \quad \begin{aligned} a'_{T-CPC} &= 5,045\sqrt{2} = 71,35\text{mm} \\ a &= 5\text{mm} \\ L &= 350\text{mm} \end{aligned} \\ \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{a'_{T-CPC} + a}{L_{T-CPC}} \right) &= 12,306 \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

$$76,35 = \frac{10(1 + \sin \theta) * 0,21313}{1 - \cos[\theta + 12,306]} \quad \rightarrow \quad \theta = 1,43^\circ \quad (\text{A.17})$$

Ecco i dati per progettare il CPC ideale progenitore:

- Front length, $L = (a' + a) \cot \theta = 8226,045\text{mm}$
- Lateral focal shift, $a = 5\text{mm}$
- Axis tilt (angolo d'accettazione), $\theta = 1,43^\circ$
- Focal, $f = a(1 + \sin \theta) = 5,125\text{mm}$
- Raggio apertura frontale, $a' = \frac{a}{\sin \theta} = 200,35\text{mm}$

B. Il principio di reversibilità

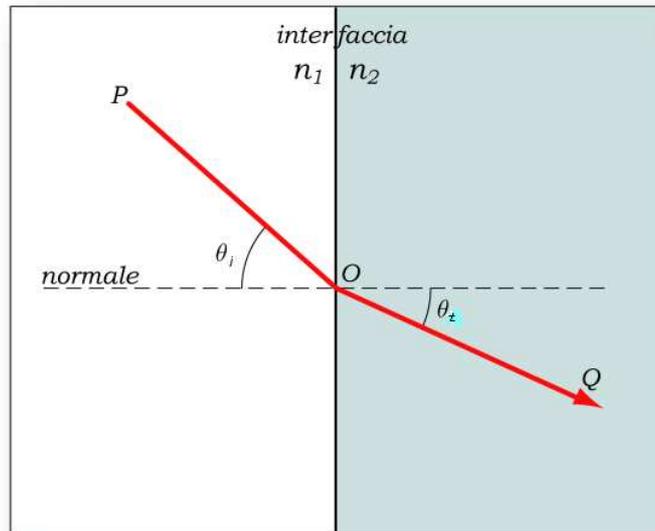


Figura 1: Un raggio che incide sull'interfaccia tra due mezzi e viene trasmesso.

Consideriamo un raggio che si propaga da un punto P in un mezzo (1) con indice rifrattivo n_1 ad un punto Q in un mezzo (2) con indice n_2 . Sia $I(0)$ l'intensità del raggio in P ed I l'intensità del raggio in Q. Il principio di reversibilità dice che, invertendo la direzione del raggio, facendolo cioè partire da Q con intensità $I(0)$, il cammino ottico rimane lo stesso ed in P il raggio ha intensità I .

Dal punto di vista geometrico il principio si dimostra con le leggi della riflessione e rifrazione di Snell, riferendoci alla figura, abbiamo:

$$\theta_i = \theta_r \tag{B.1}$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r \tag{B.2}$$

Ovviamente in un cambio di direzione abbiamo la semplice inversione degli angoli nelle formule (B.1) e (B.2), ed è facile vedere che questo ci porta allo stesso cammino ottico. Per dimostrare che anche le intensità nei due punti si invertono ma rimangono le stesse utilizzeremo le equazioni di Fresnel. Consideriamo ora un'onda elettromagnetica al posto del raggio di prima. Sia A_i l'ampiezza dell'onda incidente, A_r l'ampiezza dell'onda riflessa e A_t l'ampiezza dell'onda

trasmessa. Assumiamo la permeabilità magnetica dei due mezzi, μ , uguale ad 1. L'intensità della luce è data da

$$S = \frac{cn}{4\pi} E^2 \quad (\text{B.3})$$

con c , velocità della luce, n indice di rifrazione del mezzo ed E intensità del campo elettrico dell'onda. La quantità di energia nell'onda primaria che è incidente su un'unità d'area della dell'intersezione dei due mezzi, per secondo, è

$$J^{(i)} = S^{(i)} \cos \theta_i = \frac{cn_1}{4\pi} |A_i|^2 \cos \theta_i \quad (\text{B.4})$$

e le energie dell'onda riflessa e trasmessa che lasciano l'unità d'area dell'intersezione per secondo sono

$$J^{(r)} = S^{(r)} \cos \theta_i = \frac{cn_1}{4\pi} |A_r|^2 \cos \theta_i \quad (\text{B.5})$$

$$J^{(t)} = S^{(t)} \cos \theta_t = \frac{cn_2}{4\pi} |A_t|^2 \cos \theta_t \quad (\text{B.6})$$

Dal rapporto tra la B.5 e la B.4, e la B.6 e la B.4 troviamo la riflettività R e la trasmittività T :

$$R = \frac{J^{(r)}}{J^{(i)}} = \frac{|A_r|^2}{|A_i|^2} \quad (\text{B.7})$$

$$T = \frac{J^{(t)}}{J^{(i)}} = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \frac{|A_t|^2}{|A_i|^2} \quad (\text{B.8})$$

Si può verificare facilmente, in accordo con la conservazione dell'energia che

$$R + T = 1 \quad (\text{B.9})$$

La riflettività e la trasmittività dipendono dalla polarizzazione dell'onda incidente. Esprimiamole in termini di componente parallela e perpendicolare rispetto alla polarizzazione. Sia α l'angolo tra il vettore E dell'onda incidente ed il piano d'incidenza. Quindi:

$$A_{||} = A \cos \alpha ; A_{\perp} = A \sin \alpha \quad (\text{B.10})$$

$$J_{||}^{(i)} = \frac{cn_1}{4\pi} |A_{||}|^2 \cos \theta_i = J^{(i)} \cos^2 \alpha \quad (\text{B.11})$$

$$J_{\perp}^{(i)} = \frac{cn_1}{4\pi} |A_{\perp}|^2 \cos \theta_i = J^{(i)} \sin^2 \alpha \quad (\text{B.12})$$

$$J_{||}^{(r)} = \frac{cn_1}{4\pi} |A_{r||}|^2 \cos \theta_i \quad (\text{B.13})$$

$$J_{\perp}^{(r)} = \frac{cn_1}{4\pi} |A_{r\perp}|^2 \cos \theta_i \quad (\text{B.14})$$

E quindi

$$R = \left(\frac{J^{(r)}}{J^{(i)}} = \frac{J_{||}^{(r)} + J_{\perp}^{(r)}}{J^{(i)}} = \frac{J_{||}^{(r)}}{J_{||}^{(i)}} \cos^2 \alpha + \frac{J_{\perp}^{(r)}}{J_{\perp}^{(i)}} \sin^2 \alpha \right) = R_{||} \cos^2 \alpha + R_{\perp} \sin^2 \alpha \quad (\text{B.15})$$

con

$$R_{||} = \frac{J_{||}^{(r)}}{J_{||}^{(i)}} = \frac{|A_{r||}|^2}{|A_{||}|^2} = \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (\text{B.16})$$

$$R_{\perp} = \frac{J_{\perp}^{(r)}}{J_{\perp}^{(i)}} = \frac{|A_{r\perp}|^2}{|A_{\perp}|^2} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (\text{B.17})$$

Allo stesso modo otteniamo

$$T = \left(\frac{J^{(i)}}{J^{(i)}} \right) = T_{\parallel} \cos^2 \alpha + T_{\perp} \sin^2 \alpha \quad (\text{B.18})$$

con

$$T_{\parallel} = \frac{J_{\parallel}^{(i)}}{J_{\parallel}^{(i)}} = \frac{n_2 \cos \theta_t |A_{III}|^2}{n_1 \cos \theta_i |A_{III}|^2} = \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_t}{\sin^2(\theta_i + \theta_t) \cos^2(\theta_i - \theta_t)} \quad (\text{B.19})$$

$$T_{\perp} = \frac{J_{\perp}^{(i)}}{J_{\perp}^{(i)}} = \frac{n_2 \cos \theta_t |A_{t\perp}|^2}{n_1 \cos \theta_i |A_{t\perp}|^2} = \frac{\sin 2\theta_i \sin 2\theta_t}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (\text{B.20})$$

Vale ancora che

$$R_{\parallel} + T_{\parallel} = 1; \quad R_{\perp} + T_{\perp} = 1 \quad (\text{B.21})$$

[7]

Un cambio del verso comporta uno scambio degli angoli θ_i e θ_r oppure θ_i e θ_t , ma questo lascia invariata la componente parallela e perpendicolare di R e T. In questo modo se l'onda viaggia da P con intensità I(0) a Q dove avrà intensità I e se viaggia da Q con intensità I(0) a P, in P avrà ancora intensità I. Nel caso l'onda attraversi più mezzi, quindi ci siano più interfacce, avremo che la trasmissività totale sarà data dal prodotto delle trasmissività delle varie intersezioni. Consideriamo ad esempio tre mezzi, A, B, C, avremo due interfacce, l'interfaccia 1, tra i mezzi A e B e l'interfaccia 2 tra i mezzi B e C. Che si vada da A a B o da B ad A il valore della trasmissività come abbiamo visto rimane sempre T(1), lo stesso vale per la seconda interfaccia con trasmissività T(2). Se quindi l'onda va da A a C la T totale sarà data da T(1)*T(2), se va da C ad A sarà data da T(2)*T(1) che dà lo stesso valore.

C. Cenni di teoria delle sfere integratrici

La sfera integratrice è un dispositivo molto utile in ottica in quanto, quando è illuminata, può essere usata come sorgente a radiazione lambertiana, mentre, quando è provvista al suo interno di un apparato fonorivelatore, può essere usata per la raccolta e la misura della luce emessa da una qualsiasi sorgente di radiazione nel campo visibile e dell'infrarosso. Per applicazioni nel VIS-NIR la sfera è realizzata con un rivestimento interno a BaSO₄ o ZnO, ma ancor meglio a Spectralon®. Per applicazioni nell'infrarosso invece, la sfera è rivestita interiormente di uno strato d'oro. La teoria di una sfera integratrice ha origine dalla teoria dello scambio di radiazione all'interno di una superficie diffondente. Consideriamo lo scambio di radiazione tra due elementi infinitesimi di due superfici diffondenti:

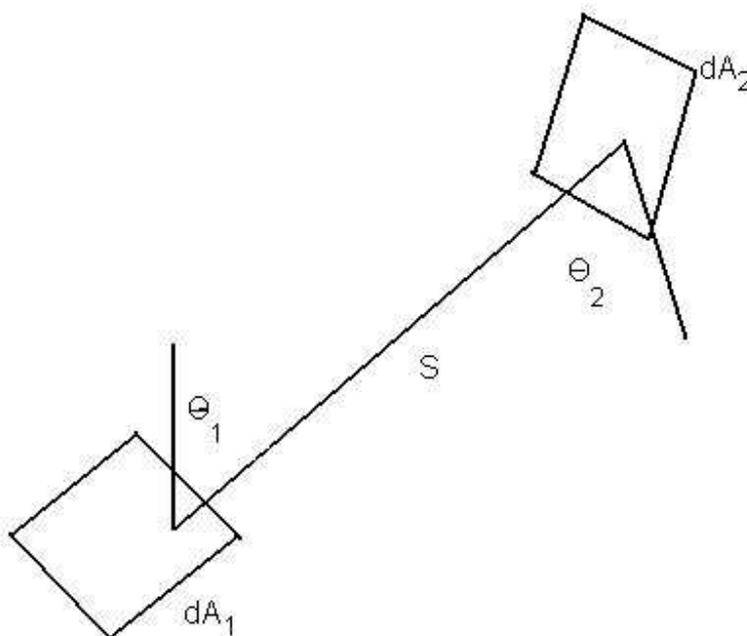


Figura C1: Scambio di radiazione tra due elementi infinitesimi di due superfici diffondenti.

La frazione di energia che lascia \$dA_1\$ ed arriva a \$dA_2\$ è conosciuta come fattore di scambio \$dF_{d1-d2}\$, ed è dato da:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 \quad (C.1)$$

Dove θ_1 e θ_2 sono gli angoli misurati che le normali alle due superfici formano con il vettore S . Consideriamo due elementi differenziali, dA_1 e dA_2 all'interno di una superficie sferica diffusiva:

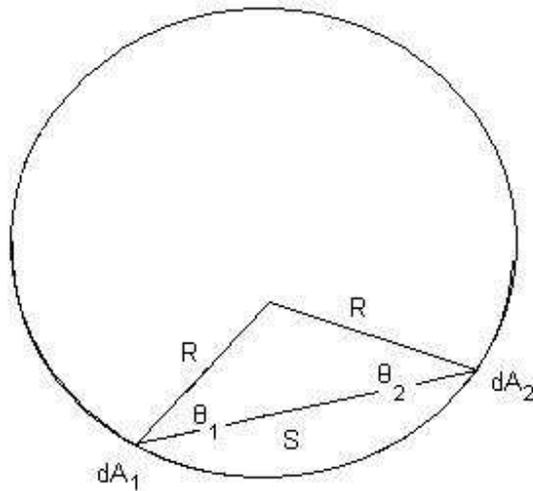


Figura C2: Superficie sferica diffusiva.

Siccome la distanza $S = 2R\cos\theta_1 = 2R \cos\theta_2$;

$$dF_{d1-d2} = \frac{dA_2}{4\pi R^2} \quad (C.2)$$

Notiamo che il risultato è indipendente dall'angolo di vista e dalla distanza tra le due aree. Quindi la frazione di flusso ricevuta da dA_2 è la stessa per ogni punto radiante della superficie della sfera. Se abbiamo un'area infinitesima dA_1 che scambia radiazione con un area finita dA_2 , l'equazione C.2 diventa:

$$dF_{d1-d2} = \frac{1}{4\pi R^2} \int_{dA_2} dA_2 = \frac{A_2}{4\pi R^2} \quad (C.3)$$

Poichè questo risultato è anche indipendente da dA_1 :

$$F_{1-2} = \frac{A_2}{4\pi R^2} = \frac{A_2}{A_s} \quad (\text{C.4})$$

Dove A_s è la area totale della sfera. Quindi, la frazione di flusso radiante ricevuto da A_2 è pari alla frazione d'area che occupa all'interno della sfera. La luce incidente su di una superficie diffondente crea una sorgente di luce di luce virtuale dovuta alla riflessione. La luce emanata dalla superficie è meglio descritta dalla sua *radianza*, la densità di flusso per unità d'angolo solido. Per ricavare la radianza di una sfera integratrice illuminata internamente partiamo con un'espressione della radianza, L , di una superficie diffondente con un flusso incidente, Φ_i .

$$L = \frac{\Phi_i \rho}{\pi A} \quad (\text{W/m}^2/\text{sr}) \quad (\text{C.5})$$

Dove ρ è la riflettanza, A l'area illuminate e π l'angolo solido totale proiettato dalla superficie. Per una sfera integratrice bisogna considerare sia le riflessioni multiple sulla superficie interna che le perdite attraverso le porte d'ingresso e uscita. Consideriamo una sfera con area della porta d'ingresso A_i e porta d'uscita A_e .

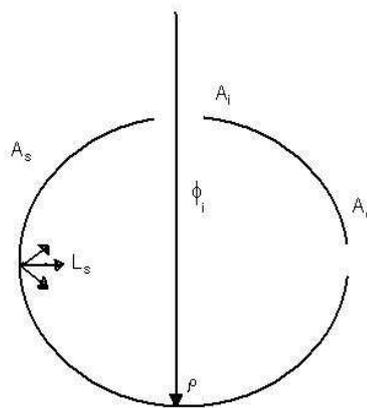


Figura C3: Flusso Φ_i che entra in una sfera integratrice.

Il flusso in ingresso è perfettamente diffuso dalla prima riflessione. La quantità di flusso incidente calcolata sull'intera superficie della sfera è:

$$\Phi_{tot} = \Phi_i \rho \left(\frac{A_s - A_i - A_e}{A_s} \right) \quad (C.6)$$

Dove la quantità tra parentesi denota la frazione di flusso ricevuto dalla sfera e che non è perso dalle porte. E' più conveniente scrivere questo termine come $(1 - f)$ dove f la frazione d'area delle porte e $f = (A_i + A_e)/A_s$. Nel caso di più di due porte, f è calcolato dalla somma delle aree di tutte le porte. Per le stesse ragioni, la quantità di flusso incidente sulla superficie della sfera dopo la seconda riflessione è:

$$\Phi_{tot} = \Phi_i \rho^2 (1 - f)^2 \quad (C.7)$$

E dopo la terza riflessione:

$$\Phi_{tot} = \Phi_i \rho^3 (1 - f)^3 \quad (C.8)$$

Segue che, dopo n riflessioni il flusso totale incidente sull'intera superficie della sfera è:

$$\Phi_n = \Phi_i \rho (1 - f) \{ 1 + \rho(1 - f) + \dots + \rho^{n-1} (1 - f)^{n-1} \} \quad (C.9)$$

Espandendola all'infinito in serie di potenze, e dato che $\rho(1-f) < 1$, la C.9 si riduce a:

$$\Phi_\infty = \frac{\Phi_i \rho (1 - f)}{1 - \rho(1 - f)} \quad (W) \quad (C.10)$$

L'equazione C.10 indica che il flusso totale incidente sulla superficie della sfera è maggiore del flusso in ingresso, a causa delle riflessioni multiple interne. Segue che la radianza della superficie della sfera è:

$$L_s = \frac{\Phi_i}{\pi A_s (1-f)} * \frac{\rho(1-f)}{1-\rho(1-f)} = \frac{\Phi_i}{\pi A_s} * \frac{\rho}{1-\rho(1-f)} \quad (C.11)$$

Questa equazione è usata per predire la radianza della sfera integratrice per un dato flusso d'ingresso come funzione del diametro della sfera, della riflettanza e della frazione d'area delle porte. Da notare che la radianza cala quando il diametro cresce.

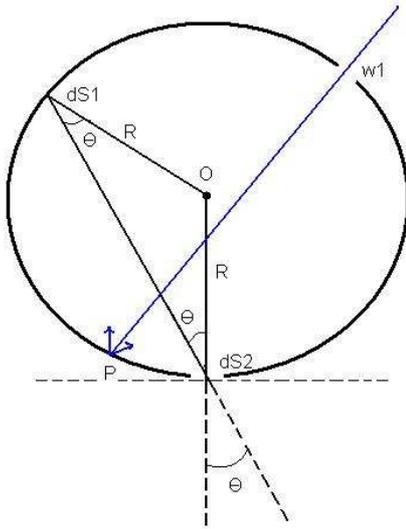


Figura C4: Sfera integratrice

[8]

Dimostriamo ora che la radianza di una sfera integratrice uniformemente illuminata è costante con l'angolo d'osservazione. Riferiamoci alla figura C4 che mostra una sfera integratrice illuminata da un fascio luminoso che entra nella sfera attraverso la finestra w1. Se la luce in ingresso è diffusa, ad esempio provenendo da un'altra sfera, all'equilibrio la superficie interna della sfera in figura sarà

uniformemente illuminata. Praticiamo nella sfera una seconda apertura, dS2, e analizziamo il flusso emesso attraverso questa apertura da parte dell'elemento generico di superficie dS1. Secondo quanto già detto analizzando l'equazione C.2, possiamo affermare che il flusso dΦ emesso attraverso la finestra dS2 e proveniente dalla superficie infinitesima dS1 è costante, qualunque sia la posizione all'interno della sfera della superficie dS1. La radianza L(θ) relativa all'angolo interno di osservazione θ sarà allora data da:

$$L(\theta) = \frac{d\Phi}{d\Omega dS_{\perp}} \quad (C.12)$$

Dove dΩ è l'angolo solido con vertice O e apertura dS2 e dS_⊥ è la proiezione ortogonale di dS1 lungo la direzione di osservazione θ. Abbiamo:

$$d\Omega = \frac{dS_2 \cos \theta}{(2R \cos \theta)^2} = \frac{dS_2}{4R^2 \cos \theta}; \quad dS_{\perp} = dS_1 \cos \theta \quad (C.13)$$

Da cui:

$$L(\theta) = \frac{d\Phi 4R^4 \cos \theta}{ds_2} \frac{1}{dS_1 \cos \theta} = \frac{d\Phi 4R^2}{dS_1 dS_2} = \text{cost} \quad (\text{C.14})$$

E' quindi dimostrato che il flusso emesso da una sfera integratrice uniformemente illuminata è costante. Se la luce in ingresso nella sfera non è abbastanza diffusa, sarà presente una zona di "primo impatto" maggiormente illuminata. Questa zona può disturbare l'emissione lambertiana della sfera. A ciò si rimedia inserendo un baffle che ha lo scopo di nascondere la zona di primo impatto alla finestra d'uscita.

CONCLUSIONI

La validità di un nuovo metodo di caratterizzazione ottica di concentratori solari chiamato ILLUME (Inverse Illumination Method) è stata investigata. Un metodo che con una sola misura permette di definire l'efficienza relativa risolta nell'angolo d'incidenza e quindi l'angolo di accettazione di un concentratore lungo ogni direzione d'incidenza. Questo comporta un notevole risparmio di tempo oltre che la possibilità di essere inserito nella fase di verifica all'interno di una catena di produzione. Già ad un'analisi visiva veloce il metodo permette di determinare eventuali difetti grossolani del concentratore.

L'applicazione del metodo è molto semplice ed economica, richiede infatti soltanto una sorgente di luce lambertiana, di uno schermo posto a distanza adeguata ed una ccd. Il metodo ILLUME, per essere applicato, richiede che lo schermo su cui è proiettata l'immagine inversa si trovi a una distanza grande rispetto alle dimensioni lineari della finestra d'ingresso del concentratore. Questo fatto non pone dei limiti quando viene fatta la simulazione al computer del concentratore; tutto al più occorre prevedere una elaborazione adeguatamente lunga per raggiungere un buon rapporto segnale/rumore. Nel caso di misure sperimentali in laboratorio, invece, il metodo si applica bene a piccoli prototipi di concentratori solari.

Un aspetto ostico del metodo è il disporre di una buona sorgente lambertiana. In analogia con quanto detto sopra a proposito della distanza concentratore-schermo, l'uso di una sorgente diffusa ideale (lambertiana) non è un problema in fase di simulazione al computer. Nelle misure sperimentali in laboratorio, invece, occorre molta attenzione a realizzare una sorgente lambertiana. In pratica si tratta di progettare una sfera integratrice con una adeguata illuminazione da parte di una sorgente esterna. Abbiamo visto infatti che anche lievi difetti possono dare misure errate di qualche decimo di grado.

La validità del metodo si basa in primis sull'elaborazione di una teoria, che in questa tesi viene accennata ma che è stata oggetto di pubblicazioni a congresso [SPIE-San Diego[14, 15], EPSEC-Milano [11, 12, 13], SIF-Pisa [10]] ed è stata sottoposta recentemente a rivista [Optics letters][16]. Un'ulteriore lavoro è previsto per il prossimo convegno fotovoltaico europeo [EPSEC-Valencia][9]. La teoria suddetta è stata contemporaneamente sottoposta a verifica attraverso un confronto simultaneo al computer tra il metodo classico di illuminazione diretta e il metodo inverso (ILLUME). Questa verifica è stata applicata a molti tipi di concentratori, in primis a quelli non-imaging: cpc ideale, cpc troncato, cpc troncato e quadrato, cpc "rondine" e poi a concentratori di tipo imaging: lente di Fresnel circolare e quadrata. In tutti questi casi le curve

ottenute avevano un'ottima corrispondenza e gli angoli d'accettazione hanno avuto al massimo una differenza nei due metodi di un paio di decimi di grado. Riteniamo che le piccole differenze riscontrate siano dovute al tempo di elaborazione limitato, avendo riscontrato chiaramente che le differenze suddette si riducono sempre più al crescere del tempo di elaborazione.

E' stato fatto anche un confronto tra il metodo inverso simulato e quello sperimentale da misure di laboratorio. Questa seconda fase è stata applicata ai due tipi di concentratori presenti in laboratorio, il cpc troncato squadrato (CPC-SQ) e il "rondine". Il prototipo di cpc squadrato è un concentratore che è stato realizzato artigianalmente, in cui, come già descritto, la parete interna è stata realizzata incollando sulla superficie di poliuretano striscioline di un film polimerico della 3M. La parete quindi presenta molti difetti, come la formazione di bolle d'aria, di gradini dovuti alla sovrapposizione delle striscioline e all'ispessimento della parete. Oltre a ciò, una lavorazione di levigatura a mano ha determinato una modifica della curvatura della parete proprio in corrispondenza dell'apertura di uscita del cpc, come ampiamente illustrato nel lavoro di tesi di V. Franceschini [4]. Anche la sfera integratrice usata come sorgente lambertiana non è ottimizzata al meglio. Non sorprende quindi che il confronto tra simulazione al computer e prove sperimentali in laboratorio abbiano mostrato una scarsa concordanza tra curva di efficienza simulata e curva sperimentale.

Al contrario per il concentratore "rondine" sono stati ottenuti dei risultati ottimi. Le curve intensità-angolo sperimentale una simulata con metodo inverso l'altra simulata con metodo diretto coincidono, e gli angoli d'accettazione anche in questo caso hanno differenze di pochi decimi di grado. Inoltre lo studio pratico sulle sorgenti lambertiane ha permesso di scoprire che materiali come carte, vetro e plastica traslucidi sono cattive sorgenti lambertiane in trasmissione. L'oggetto migliore rimane la sfera integratrice, molto sensibile però a difetti di illuminazione e verniciatura interna.

BIBLIOGRAFIA

[1] “**Concentrator Photovoltaics**” edit. A. L. Luque, V. M. Andreev, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007. Capitolo 11: Phovoltaic Concentrators, R. M. Swanson.

[2] “**Nonimaging Optics**” R. Winston (University of California, Merced, CA), J. C. Minano (Technical University of Madrid UPM, CEDINT, Madrid, Spain and Light Prescriptions Innovators LLC, Irvine, CA), P. Benítez (Technical University of Madrid UPM, CEDINT, Madrid, Spain and Light Prescriptions Innovators LLC, Irvine, CA), © Elsevier Inc. 2005. Capitoli 1,2,4.

[3] “**Field guide to Illumination**”, A. V. Arecchi, T. Messadi, R. J. Koschel, published by SPIE, Washington USA, Copyright © 2007 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers

[4] Tesi di Laurea in Fisica “**Caratterizzazione ottica con fascio laser e simulazione di concentratori solari non-imaging**” di V. Franceschini, relatori: Dott. M. Stefancich, Dott. A. Parretta. Università degli studi di Ferrara, A.A. 2006-2007. Capitolo 2 e 3.

[5] “**TracePro User’s Manual**” Release 3.0. Copyright © 2002 by Lambda Research Corporation.

[6] Relazione ENEA classificazione TER ECE07040, titolo: “**Caratterizzazione ottica di concentratori solari con un metodo di ntonimi ione inversa**”, autori: A.Parretta, A.Antonini, E.Milan, M.Stefancich. 27 NOV 2007.

[7] Max Born, Emil Wolf, **Principles of Optics**. Pergamon Press Ltd. Headington Hill Hall Oxford OX3 0BW, England. First Published 1959.

[8] **A Guide to Integrating Sphere Theory and Applications**, LabSphere®. www.labsphere.com

[9] A. Parretta, A. Antonini, M.A. Butturi, P. Di Benedetto, E. Milan, M. Stefancich, D. Uderzo, P. Zurru, D. Roncati, G. Martinelli, M. Armani, “**How to “Display” the Angle-Resolved**

Transmission Efficiency of a Solar Concentrator Reversing the Light Path”, submitted for the 23rd EPSEC, 1-5 September 2008, Feria Valencia, Valencia, Spain.

[10] A. Parretta, A. Antonini, M. Stefancich, G. Martinelli, M. Armani, **“Metodo “inverso” per la caratterizzazione ottica di concentratori solari”**, oral presentation at the 93^o Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, Pisa, 24-29 Settembre 2007.

[11] 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.

[12] 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. Subject 1: Advanced Photovoltaics. Subsection 1.4: Terrestrial Concentrator Systems.

[13] A. Antonini, M. Stefancich, P.Zurru, M. Butturi, P. Di Benedetto, D. Uderzo, E. Milan, G. Martinelli, M. Armani, A. Parretta, N. Baggio, L. Secco, **“Experimental Results of a New PV Concentrator System for Silicon Solar Cells”**, 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] A. Parretta, A. Antonini, E. Milan, M. Stefancich, G. Martinelli, M. Armani, “**Optical efficiency analysis of solar concentrators by a reverse optical path method**”, submitted to Optics Letters.

RINGRAZIAMENTI

Prima di tutto un grazie sentito al Dott. Antonio Parretta, che mi ha permesso di svolgere questo lavoro di tesi. Grazie per tutto quello che mi ha insegnato, per la sua gentilezza e disponibilità, e per la passione che mi ha trasmesso in questo lavoro.

Grazie al mio secondo relatore Andrea Antonini, per essere sempre stato disponibile, per i suoi insegnamenti e le sue correzioni.

Un grazie sentito al Prof. Martinelli per aver messo a disposizione i laboratori del grupo di Sensori e semiconduttori.

Grazie inoltre a Emiliano Milan ed a Maurizio Armani per le tutte le informazioni che mi hanno dato.

Grazie alla mia famiglia per avere appoggiato e sostenuto sempre le mie scelte e per il clima di serenità che mi fanno trovare ogni giorno e che mi ha permesso di dare sempre il massimo nello studio.

Grazie ai miei compagni, Fabio e Michelangelo, per la compagnia fino ad ora tarda durante la preparazione finale di questa tesi, grazie ad Angela, Fau e Susanna per gli aiuti che mi hanno dato nello studio durante questi due anni oltre che per la compagnia data.

Infine un ringraziamento particolare a Maria per l'indispensabile spinta e determinazione che mi ha trasmesso, questo è per lei:

Acum aproape trei ani mi-am propus un țel pe care nu l-aș fi atins niciodată atât de repede, fără să te fi avut pe tine alături, pentru a-mi da putere și motivație. Ți mulțumesc pentru zilele petrecute împreună, zile care m-au încărcat cu energie și pentru că ai crezut în mine.