



Dottorato di ricerca in Meccanica Agraria - XXV ciclo

Tesi di Dottorato

**Concentratore solare per uso fotovoltaico e
illuminotecnico**

Relatore: Prof. Ing. Maurizio Carlini

Dottorando:

Dott. Ing. Andrea O.M. Tucci

ANNO ACCADEMICO 2012/2013

$$1+10 = 3! \ \& \ \text{V.I.P}$$

INTRODUZIONE

Le serre vengono generalmente definite come locali in forma di padiglioni vetrati idonei, alla coltivazione ed alla conservazione in vivo di specie vegetali.

Presentano un differenziale climatico rispetto all' esterno e possono essere ricondotte rispetto al funzionamento in due gruppi: attive e passive, a seconda se il clima, al loro interno, sia o meno artificialmente stabilizzato.

Garantiscono una temperatura idonea, condizioni adeguate di luce, umidità e una percentuale di anidride carbonica controllata , è possibile quindi coltivare anche fuori sia della stagione sia dell' area di distribuzione della specie oltre che ottimizzare la produzione in ogni momento dell' anno.

L'energia necessaria per creare le condizioni ambientali cercate può essere recuperata, tra le soluzioni esistenti, anche sfruttando le fonti di energia rinnovabile come per esempio e' stato fatto attraverso l'utilizzazione di impianti fotovoltaici.

Una classe di questi impianti è stata ideata e realizzata coniugando l'utilizzo dei fotodiodi a elementi di raccolta dei raggi solari; tale tipologia di sistemi viene classificata con il nome di sistemi a concentrazione. Sfruttando una o più superfici, l'energia irradiata viene convogliata verso un'area deputata all'assorbimento, detta ricevitore, sede della cella fotovoltaica.

Le geometrie ottiche ed i sistemi di puntamento, ottimizzati per lavorare in costante allineamento con la sorgente, permettono di aumentare il rapporto tra le superfici di cattura e l'assorbimento specifico, mantenendo estremamente contenute le dimensioni dei moduli che compongono la struttura.

L'analisi dei diottri su questa tipologia di sistemi, ha evidenziato inoltre la possibilità di progettare e sviluppare sistemi ottici a concentrazione che grazie a comuni guide di luce, che consentissero il trasporto dei raggi del sole, riducendo o eliminando quindi la quota di elettricità destinata all'illuminazione degli ambienti durante le ore diurne.

Il lavoro svolto per questa tesi, ha avuto lo scopo di modellizzare un concentratore solare che potesse essere utilizzato simultaneamente sia per l'illuminazione, che per la conversione della radiazione solare catturata in energia

elettrica. Questo dispositivo, basa il suo principio di funzionamento, sullo sfruttamento su uno specchio dicroico che divide la radiazione catturata dall'ottica di raccolta, inviando la parte dello spettro visibile ad una guida di luce, e quella infrarossa ad una cella fotovoltaica.

La tesi è organizzata in tre parti. Nella prima sono stati descritti i sistemi attualmente in uso per la conversione della radiazione solare in energia elettrica e quelli utilizzati per l'illuminazione tramite le fibre ottiche.

Nella seconda, capitoli 2 e 3, sono state presentate le misure sperimentali condotte sulle fibre individuate ed il modello numerico costruito per descrivere la risposta termo strutturale del sistema.

La sintesi di questi dati è stata utilizzata come base di partenza, capitolo 4, per la progettazione e l'ottimizzazione dell'intero dispositivo.

Nel capitolo 5 sono state presentate le conclusioni e le ipotesi sui lavori futuri.

SOMMARIO

1	– CONCENTRATORI SOLARI E SISTEMI DI ILLUMINAZIONE	1
2	- FIBRE OTTICHE E APPARATI SPERIMENTALI PER LA LORO CARATTERIZZAZIONE	17
2.1	INTRODUZIONE	17
2.2	APPARATO SPERIMENTALE	17
2.3	ALLINEAMENTI E METODOLOGIA DI MISURA.....	19
2.4	FIBRE TESTATE E RISULTATI.....	21
2.5	ERRORI DI ALLINEAMENTO	26
2.6	DISCUSSIONE DEI RISULTATI	34
3	- ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI E VERIFICA SPERIMENTALE DI UNA FIBRA OTTICA	36
3.1	INTRODUZIONE	36
3.2	DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO.....	36
3.3	CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E PROPRIETÀ FISICHE	37
3.4	MESHES.....	40
3.5	DATI INIZIALI PER LE SIMULAZIONI	41
3.6	APPROCCIO NUMERICO.....	41
3.6.1	Flusso laminare	42
3.6.2	Regime turbolento.....	43
3.7	ARRANGIAMENTO SPERIMENTALE	44
3.8	RISULTATI.....	48
3.8.1	Simulazioni numeriche in regime laminare	48
3.8.2	Simulazioni numeriche per il regime turbolento	50
3.8.3	Dati sperimentali.....	52
3.9	DISCUSSIONE DEI RISULTATI	53

4	- MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA	55
4.1	INTRODUZIONE	55
4.2	SPECIFICHE DELLA SORGENTE	55
4.3	CARATTERISTICHE DELLA CELLA FOTOVOLTAICA	60
4.4	MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA.....	62
4.4.1	Raytracing sequenziale	63
4.4.2	Raytracing non sequenziale	74
4.5	DISCUSSIONE DEI RISULTATI	83
5	- CONCLUSIONI.....	84
	NOMENCLATURA	86
	BIBLIOGRAFIA	87

1 – CONCENTRATORI SOLARI E SISTEMI DI ILLUMINAZIONE

L'utilizzo dell'energia solare ha radici antiche: Senofonte racconta nei suoi Memorabili degli insegnamenti del filosofo greco Socrate (470-399 AC) sul corretto orientamento delle abitazioni per ottenere case calde d'inverno e fresche d'estate. Una storia più recente racconta di come Archimede, nel 212 AC, concentrando l'energia radiante bruciasse le flotte romane e diciotto secoli dopo Atanasio Kircher (1601-1680) effettuasse alcuni esperimenti con un collettore formato da specchi, cercando di incendiare una catasta di legna, per verificare i fondamenti scientifici di tale accadimento [1]. Durante il diciottesimo secolo, cominciarono ad essere diffusi in Europa e nel Medio Oriente, delle fornaci solari, che utilizzavano un sistema di concentrazione, costituito da un insieme di diottri opportunamente arrangiati, in grado di fondere il metallo. Tra questi, merita di essere ricordato, quello che venne progettato dallo scienziato francese Antoine Lavoisier, che raggiunse la notevole temperatura 1758°C. Durante il diciannovesimo secolo iniziarono i primi tentativi di convertire l'energia raccolta e August Monchot tra il 1864 ed il 1878 studiò le prime macchine a vapore alimentate attraverso i collettori solari. Questi studi, e quelli condotti parallelamente da altri scienziati, ebbero un punto di svolta fondamentale nel 1958, quando venne costruito il primo pannello in silicio che sfruttava l'effetto fotovoltaico.

Questa tecnologia, grazie agli sforzi dei ricercatori di tutto il mondo, è stata costantemente evoluta durante il mezzo secolo successivo e una particolare classe di questi dispositivi, è stata sviluppata cercando massimizzare ed ottimizzare le geometrie delle superfici di raccolta, focalizzando su sistemi di conversione sempre più piccoli, l'energia radiante catturata.

L'analisi dei diottri su questa tipologia di sistemi, ha evidenziato, in tempi recenti, come fosse possibile progettare e sviluppare, sistemi ottici a concentrazione, che grazie a comuni guide di luce, permettessero il trasporto dei raggi del sole direttamente all'interno degli edifici, eliminando quindi la quota di elettricità destinata all'illuminazione degli ambienti durante le ore diurne.

Nei paragrafi successivi saranno presentati diversi sistemi a concentrazione sia per la conversione fotovoltaica classifica (CPV- *concentrator photovoltaic*) che per quella illuminotecnica. Questi dati verranno utilizzati come base di partenza per lo studio del sistema presentato in questo lavoro.

Definizioni

Il rapporto di concentrazione geometrica C rappresenta la relazione tra l'area di raccolta del collettore e l'area proiettata sul piano focale:

$$C = \text{Area}_{\text{raccolta}} / \text{Area}_{\text{ricevitore}}.$$

L'angolo di accettazione: identifica la porzione di cielo che il sistema ottico riesce a *vedere* e trasferire al ricevitore. La massima accettazione possibile, è funzione del rapporto di concentrazione e viene definita per i sistemi di concentrazione lineari e bidimensionali rispettivamente come:

$$C_{\text{max},2D} = n_{\text{cell}} / \sin\theta_B \text{ e } C_{\text{max},3D} = n_{\text{cell}}^2 / \sin^2\theta_B$$

θ_B identifica la metà dell'angolo di accettazione, n_{cell} l'indice di rifrazione del mezzo che circonda il ricevitore.

L'efficienza ottica η , rappresenta, il rapporto normalizzato tra la quantità di luce raccolta e quella che riesce a raggiungere il ricevitore. Nel calcolo di questo parametro, debbono essere tenuti in considerazione vari fattori, tra i quali, le perdite di Fresnel, gli assorbimenti del materiale, la luce riflessa dal sistema e quella che viene in qualche modo *persa* prima di raggiungere il ricevitore.

La concentrazione effettiva:

$$C_{\text{effective}} = C^* \eta_{\text{optics}}$$

definisce il rendimento reale del sistema ed è il prodotto tra il rapporto di concentrazione e il rendimento ottico.

Le prestazioni complessive dei sistemi, saranno definite come il prodotto tra la concentrazione effettiva e il rendimento dei ricevitori.

$$\eta_{\text{tot}} = C_{\text{effective}} * \eta_{\text{devices}}$$

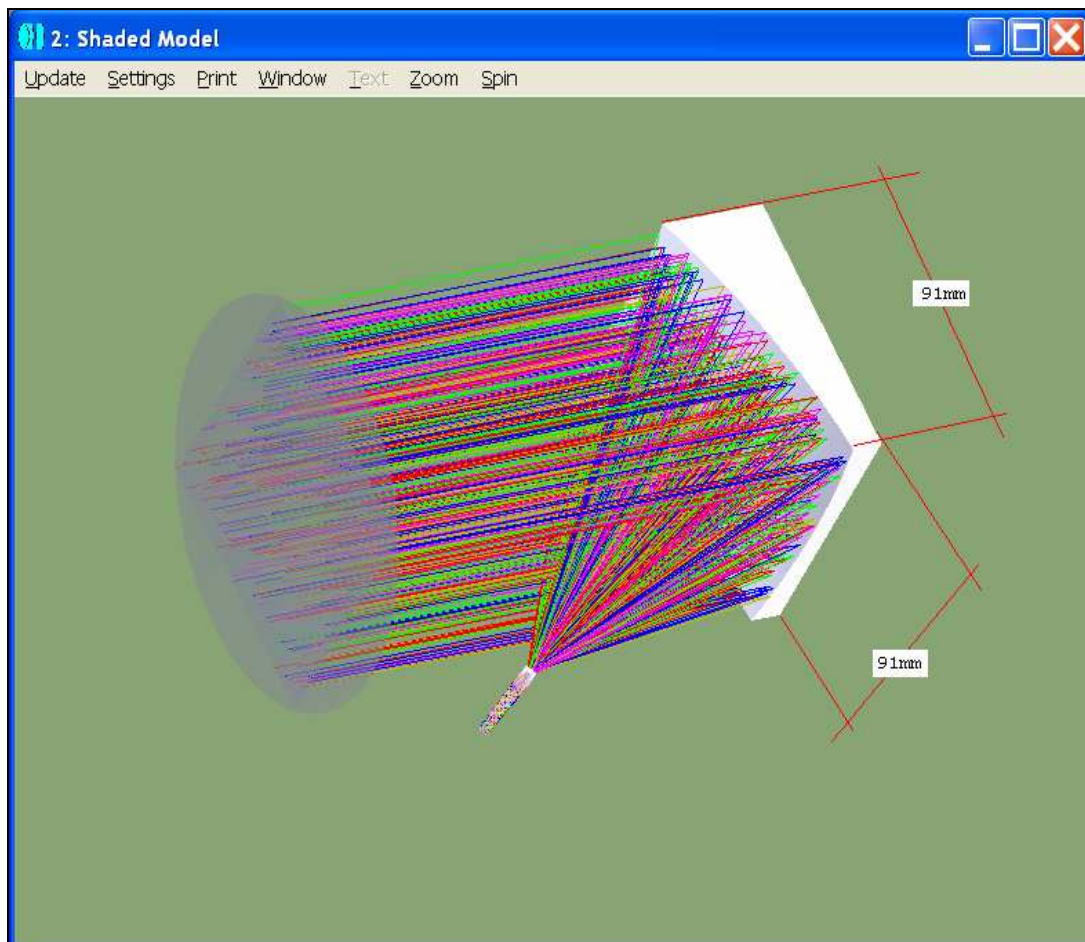


Figura 1.1 Esempio di concentratore solare progettato con uno specchio parabolico fuori asse

- **Concentratori con $C < 10$**

Questo tipo di dispositivi è caratterizzato da un basso rapporto di concentrazione. Nella tabella 1.1, sono stati riportati alcuni dei sistemi attualmente in produzione appartenenti a questa tipologia di sistemi, il tipo di schema ottico adottato ed il rapporto di concentrazione [7-8] .

Company	Optics Type	Concentration	Tracking	URL
Abengoa Solar	Reflective V-trough	1.5 - 2.2	Two-axis	www.abengoasolar.com
Covalent Energy	Fluorescent lightguide	5	Fixed	www.covalentsolar.com
Prism Solar Technologies	Holographic	2	Fixed	www.prismsolar.com
Solaria	Linear trough	2	Fixed	www.solaria.com
Stellaris	TIR V-trough	3	Fixed	www.stellaris-corp.com
WS Energia	Reflective V-trough	2	Fixed	www.ws-energia.com
Zytech Solar	Reflective V-trough	1.6	Fixed	www.zytech.es

Tabella 1.1 CPV con $C < 10$

C è solitamente compreso tra 1.5 e 4 e non sono previsti sistemi di inseguimento tranne in alcuni impianti destinati a grandi installazioni (Abengoa Solar). La movimentazione, in questo caso, permette di ridurre in maniera sensibile le perdite dovute all'*effetto coseno*.

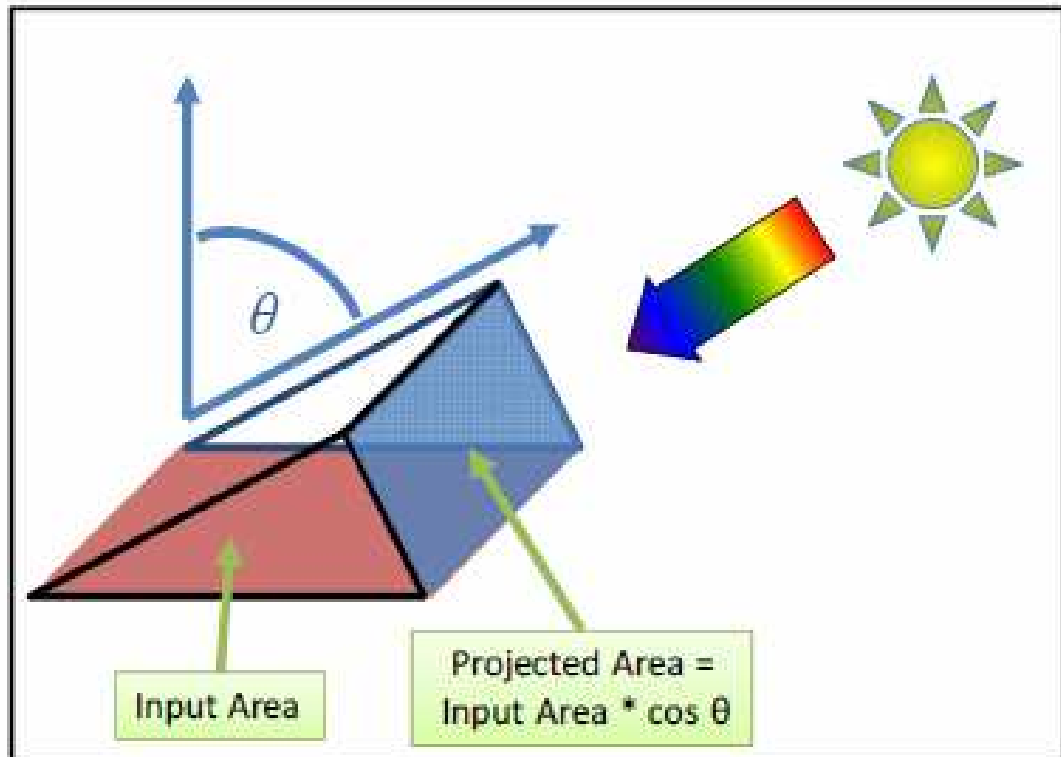


Figura 1.2 Riduzione dell' area di cattura dovuta all' effetto coseno



Figura 1.3 Sistema di un impianto di concentrazione con ricevitori con $C=2$

Questi sistemi hanno sono progettati per avere basse efficienze $\eta < 10$, grandi angoli di accettazione $\theta_B \approx 30^\circ$ e soprattutto contenere i costi. Sono tipicamente utilizzate delle celle in silicio.

- **Concentratori con $10 < C < 100$**

I concentratori compresi in questa categoria necessitano di un sistema di inseguimento della sorgente, sono caratterizzati da un angolo di accettazione più stretto rispetto alla classe precedente e utilizzano celle fotovoltaiche in silicio.

Nella tabella 1.2 è riportato un breve elenco di aziende che hanno sviluppato questa categoria di impianti [7-8], il tipo di schema ottico utilizzato e il rapporto di concentrazione.

Company	Optics Type	Concentration	Tracking	URL
Absolicon Solar Concentrator	Reflective trough	10	One-axis NS	www.absolicon.com
Cpower	Reflective Point-focus	25	Two-axis	www.cpower.it
Entech Solar	Extruded Cylinder Fresnel	20	Two-axis	www.entsolar.com
HelioDynamics	Reflective louvered trough	50	One-axis NS	www.hdsolar.com
Skyline Solar	Reflective trough	10	One-axis NS	www.skyline-solar.com
Whitfield Solar	Reflective trough	70	One-axis EW	www.whitfieldsolar.com

Tabella 1.2 CPV con $10 < C < 100$

Quattro di questi sistemi, sono formati da un'ottica con profilo parabolico che concentra l'energia radiante catturata su una linea, sfruttando un sistema di movimentazione su un solo asse e una geometria ottica ottimizzata per un'ampia accettazione nella direzione fissa[10]. I riflettori sono molto economici da produrre e sono stati soggetti ad una forte ingegnerizzazione, grazie alla loro possibile utilizzo nel solare termico [11].

Questa tipologia di sistemi, ha iniziato ad essere sviluppata anche per dispositivi ad alta efficienza che sfruttano la divisione della banda spettrale emessa dal sole [12]. La luce incidente, è focalizzata da un elemento rifrattivo per poi essere divisa per mezzo di uno specchio diecrico, che permette l'accoppiamento dei due piani immagine con due ricevitori, ottimizzati rispettivamente per la banda visibile e la radiazione infrarossa.

La figura 1.4, mostra lo schema di funzionamento del modulo sviluppato da un gruppo di ricercatori presso la University of Rochester all' interno del programma

DARPA (Very High Efficiency Solar Cell program). Il dispositivo, caratterizzato da un rapporto di concentrazione $C=40$, ha sviluppato un rendimento complessivo del 38.5%[13] con un campo di vista pari a ± 5 gradi.

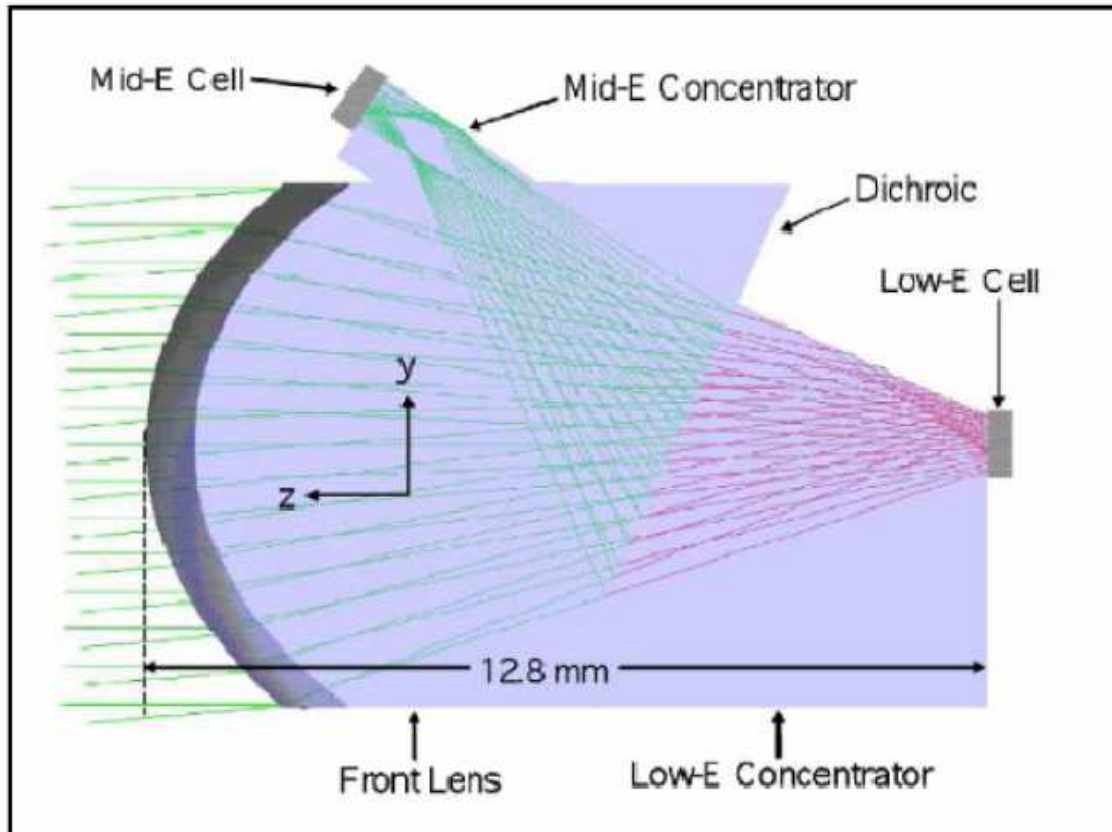


Figura 1.4 Progetto ottico del modulo ad alta efficienza sviluppato per DARPA VHESC

- **Concentratori con $C > 100$**

Questa tipologia di sistemi, rappresenta il settore più avanzato nel campo dei concentratori solari e quello nel quale si stanno focalizzando i maggiori sforzi della ricerca. La riduzione dei costi ottenuta dalla miniaturizzazione delle celle fotovoltaiche e l'aumento delle efficienze di questi dispositivi, subiscono un miglioramento continuo, al quale, viene parallelamente affiancato, lo studio e l'ottimizzazione delle componenti ottiche e dei sistemi d'inseguimento [14-17].

Questi dispositivi possono, genericamente, essere raccolti in due categorie: quelli che utilizzano componenti rifrattive come le lenti di Fresnel e sistemi che invece si basano su ottiche riflettive.

La figura 1.5 è rappresentativa di una simulazione di un sistema a specchi utilizzato per concentrare la radiazione solare. Nella figura 1.6 è riportata invece l'immagine di una lente di Fresnel, mentre nella tabella 1.3 sono elencati alcuni dei sistemi attualmente in produzione appartenenti a questa tipologia di sistemi, il loro schema ottico e il rapporto di concentrazione.

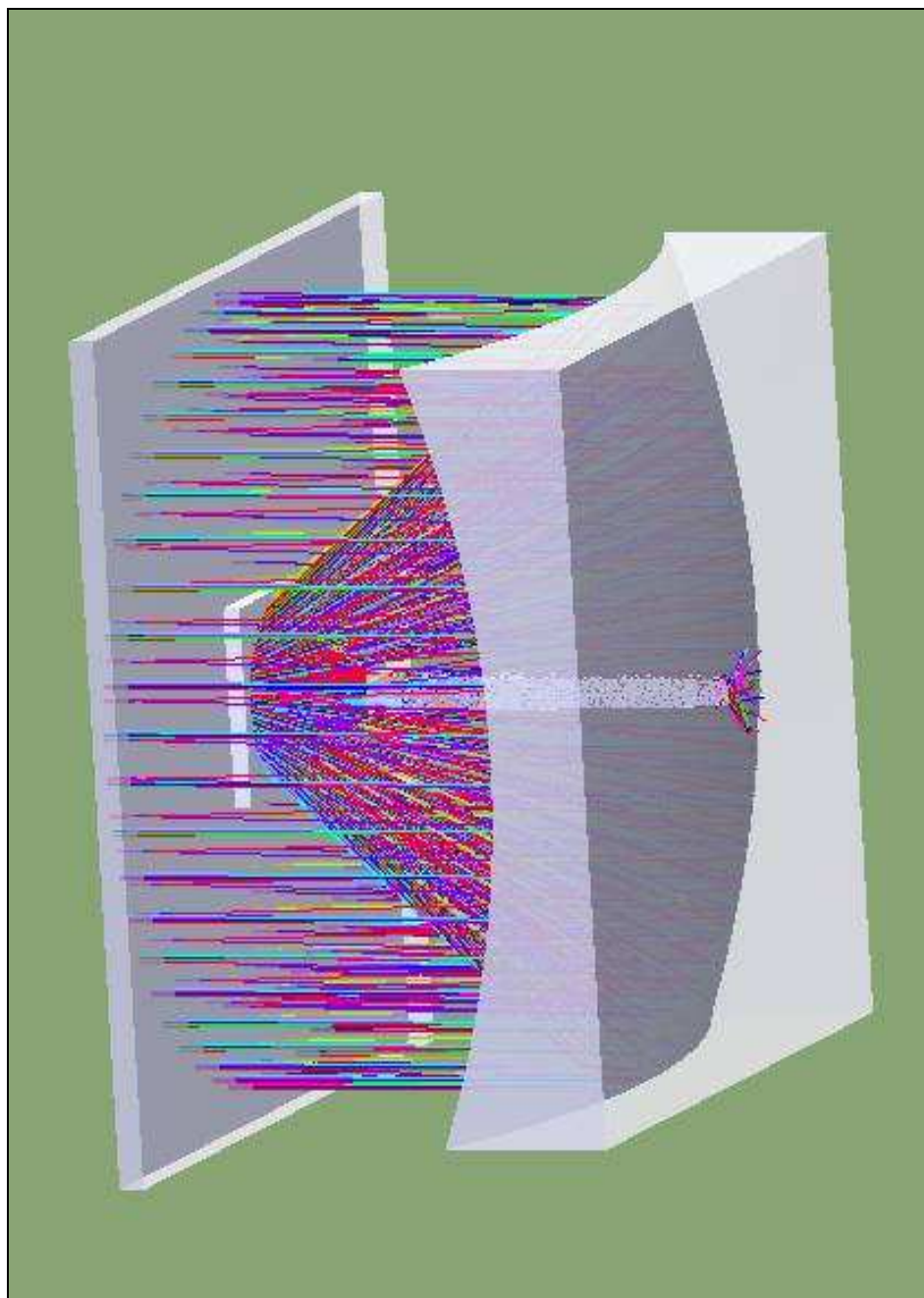


Figura 1.5 Concentratore con $C > 100$ costruito tramite un sistema a specchi



Figura 1.6 Concentratore con una lenti di Fresnel

Company	Optics Type	Concentration	Tracking	URL
AEST	Refractive point-focus	500	Two-axis	www.aest.it
Amonix	Refractive point-focus	500	Two-axis	www.amonix.com
Arima Eco Energy Tech	Refractive point-focus	476	Two-axis	www.arimaeco.com
Beghelli	Refractive point-focus	500	Two-axis	www.beghelli.it
Concentrix Solar	Refractive point-focus	385	Two-axis	www.concentrix-solar.de
Cool Earth Solar	Reflective point-focus	400	Two-axis	www.coolearthsolar.com
Encore	Refractive point-focus	1050	Two-axis	www.emcore.com
Enea Portici Research Center	Refractive point-focus	300	Two-axis	www.enea.it
Energy Innovations	Refractive point-focus	1200	Two-axis	www.energyinnovations.com
Enfocus Engineering	Refractive point-focus	300	Two-axis	www.enfocus.us
Everphoton	Refractive point-focus	1000	Two-axis	www.everphoton.com
Green and Gold Energy	Refractive point-focus	1370	Two-axis	www.greenandgoldenergy.com.au
Greenfield Solar	Segmented reflective dish	1000	Two-axis	www.greenfieldsolar.com
Greenvolts	Reflective point-focus	1000	Two-axis	www.greenvolts.com
Guascor Foton	Refractive point-focus	400	Two-axis	www.guascorfoton.com
INER	Refractive point-focus	476	Two-axis	www.iner.gov.tw
Isoton	Refractive point-focus	1100	Two-axis	www.isoton.com
Menova Energy	Reflective louvers	1450	Two-axis	www.power-spar.com
Morgan Solar	Stepped lightguide	1100	Two-axis	www.morgansolar.com
Opel	Refractive point-focus	500	Two-axis	www.opelinc.com
Pyron Solar	Refractive point-focus	1000	Two-axis	www.pyronsolar.com
Shap	Reflective dish	500	Two-axis	www.shap.it
Sharp	Refractive point-focus	700	Two-axis	www.sharp.co.jp
Sol3g	Refractive point-focus	476	Two-axis	www.sol3g.com
Solar Systems	Reflective dish	500	Two-axis	www.solarsystem.com.au
Solfocus	Reflective point-focus	500	Two-axis	www.solfocus.com
Soliant Energy	Refractive point-focus	500	Two-axis	www.soliantenergy.com
Sunrgi	Refractive point-focus	1000	Two-axis	www.sunrgi.com
Zenith Solar	Reflective dish	1000	Two-axis	www.zenithsolar.com

Tabella 1.3 Concentratori con C>100

Questa classe di concentratori è caratterizzata da angoli di accettazione stretti, stimabili in pochi gradi e rendimenti ottici elevati, tipicamente maggiori di 0.6.

I sistemi solari a concentrazione, basati su lenti di Fresnel, garantiscono ottiche con aperture relative caratterizzate da valori prossimi a 0.5 [18-20] ed una produzione economica di questi componenti grazie ai materiali plastici con i quali vengono costruiti.

I sistemi che sfruttano invece componenti riflettive, utilizzano l'accoppiamento di uno o più specchi, per focalizzare la radiazione luminosa catturata. Questa tipologia di dispositivi non è affetta da aberrazioni cromatiche e rende possibile un aumento significativo del rapporto di concentrazione. Le note negative sono rappresentate dai problemi di oscuramento e quindi di riduzione della porzione di radiazione catturata, dal costo a volte elevato del sistema ottico e dalle strette tolleranze necessarie per il loro corretto funzionamento [21].

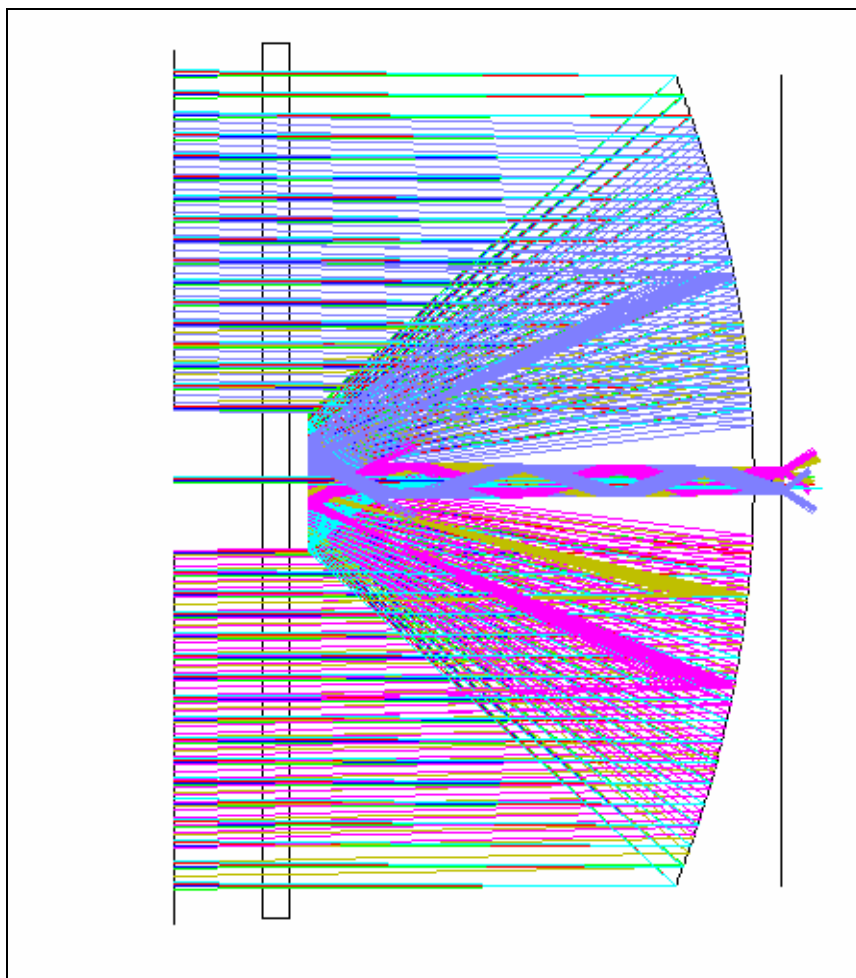


Figura 1.7 Concentratore solare a specchi su base Cassegrain

- **Concentratori a uso illuminotecnico**

Lo studio approfondito dei sistemi ottici destinati alla conversione fotovoltaica, ha evidenziato la possibilità di sfruttare l'accoppiamento di questi componenti con comuni guide di luce per l'illuminazione diurna, riducendo drasticamente la quota di energia elettrica destinata a questo scopo [22]. L'ottimizzazione dei dispositivi per la raccolta e il trasferimento della radiazione luminosa caratterizzati da rapporti di concentrazioni elevati e un costante miglioramento delle capacità di trasmissione delle fibre ottiche ha portato alla realizzazioni di diversi dispositivi basati su questa tecnologia [23-31].



Figura 1.8 Dispositivo di illuminazione a fibre ottiche Inoa 2003

Alcuni di questi sistemi, sono stati progettati, sfruttando le aberrazioni cromatiche delle ottiche e trasferendo alla guida di luce solo la parte della radiazione visibile [31].

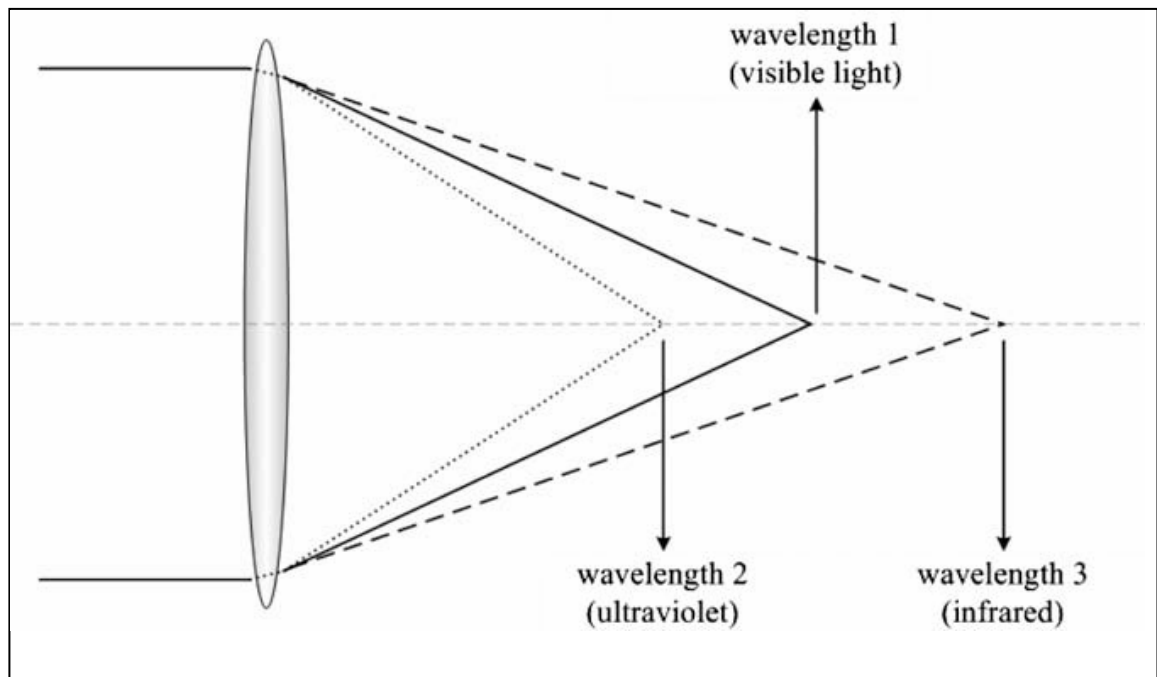


Figura 1.9 Effetto della aberrazione cromatica su una singola lente causata da un fascio policromatico in ingresso

I rendimenti di questo tipo di sistemi sono solitamente elevati con valori, in alcuni casi, maggiori dello 0.7. La figura 1.10 mostra il sistema ottico utilizzato per il progetto Girasoli (Francini et al. 2003).

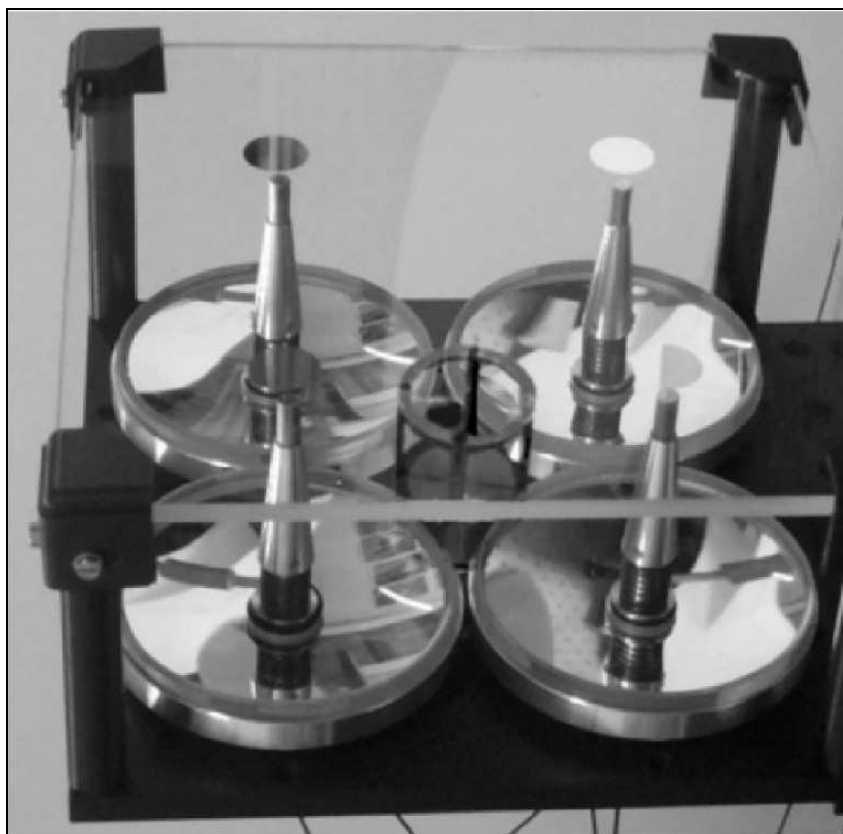


Figura 1.10 Ottica di raccolta progetto girasoli

Il punto critico di questi dispositivi è nell' accoppiamento con la fibra ottica e nell' alto costo di produzione per i concentratori, nel caso in cui vengano utilizzati arrangiamenti a specchi. La figura 1.11, mostra un sistema di fuocoheggiamento utilizzato per le guide di luce di un illuminatore a fibre ottiche.



Figura 1.11 Sistema di fuocoheggiamento per l'accoppiamento delle fibre ottiche (INOA 2003)

- **Basi del sistema di partenza**

Nei paragrafi precedenti, sono stati presentati alcuni sistemi in grado di sfruttare l'energia radiante catturata per la conversione fotovoltaica e per l'illuminazione.

Una stima fondata sull'analisi critica della bibliografia scientifica, sulle prime risposte dei prototipi costruiti e sulle applicazioni di codici di calcolo specialistici per le simulazioni dei sistemi ottici, ha evidenziato la possibilità di progettare un sistema in grado di sfruttare simultaneamente l'intera quota di energia raccolta, utilizzando la parte visibile per l'illuminazione e la restante per la conversione in energia elettrica.

Le criticità, sono state individuate negli accoppiamenti con la fibra, nelle temperature tipiche dei sistemi ad alta concentrazione, che influenzano negativamente i rendimenti dei dispositivi di conversione, e nella necessità di definire un'ottica di raccolta il più semplice possibile ma al tempo stesso efficiente.

Questi punti, sono stati affrontati attraverso la sperimentazione condotta su un insieme di guide a luce e tramite l'ausilio di un modello numerico. L'analisi dei dati raccolti, ha permesso lo studio e l'ottimizzazione di un dispositivo che è stato analizzato e discusso nell'ultima parte di questo lavoro.

2 - FIBRE OTTICHE E APPARATI SPERIMENTALI PER LA LORO CARATTERIZZAZIONE

2.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo verranno presentati i risultati delle sperimentazioni condotte sulle fibre ottiche individuate per la trasmissione della radiazione visibile e l'apparato sfruttato per caratterizzarle. La sintesi dei risultati ottenuti permetterà di definire alcune peculiarità delle ottiche di raccolta e le tolleranze negli accoppiamenti tra i vari componenti del sistema.

2.2 APPARATO SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale utilizzato per queste misure può essere suddiviso in quattro componenti principali: la sorgente, l'ottica, la fibra e il rivelatore. La figura 2.1 schematizza l'impianto utilizzato.

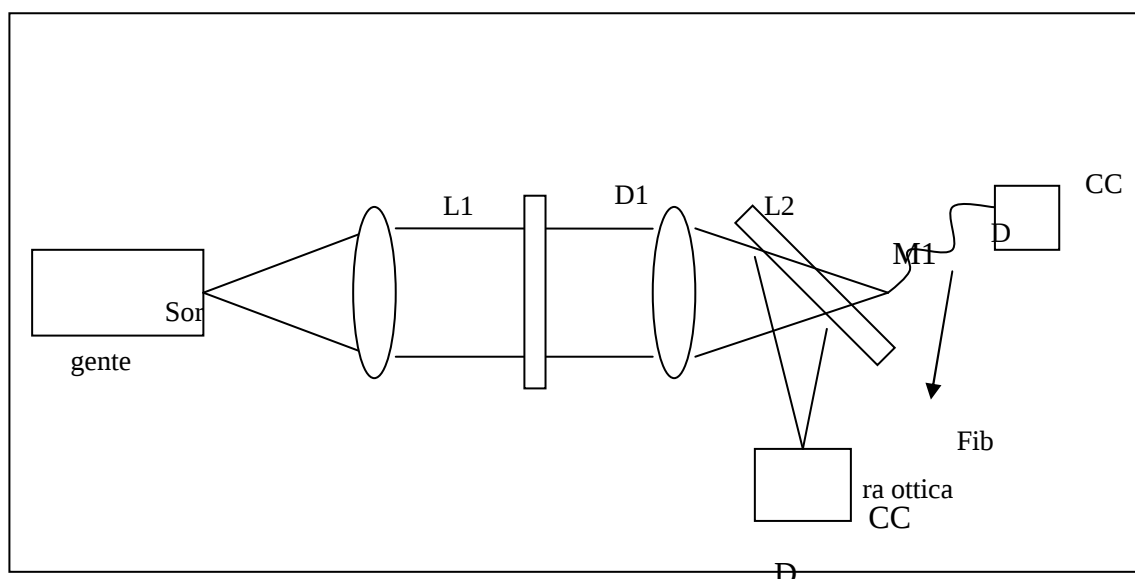


Figura 2.1 Schema dell' apparato sperimentale

- La sorgente: è costituita da una sfera integratrice al cui interno è posta una lampadina alogena da 10W. All'uscita sono stati sistemati vari pinhole con diametri compresi 100 e 800 μ m;
- L'ottica: lo schema individuato per la sperimentazione è formato da due doppietti acromatici, indicati con L1 e L2, entrambi di focale effettiva $f=100$ e diametro $\varnothing=50.8$. Questi due elementi sono stati disposti in modo tale da ottenere un fascio collimato tra loro. Nello spazio che li separa è stato posto un diaframma di apertura variabile. E' presente anche uno specchio di piegamento M1 montato su un supporto scamottabile per focalizzare il fascio della sorgente su un rivelatore senza muovere il porta fibra;
- Le fibre: questi componenti sono stati accoppiati al sistema utilizzando due montature, una per l'ingresso e l'altra per l'uscita. Questo arrangement è stato reso solidale ad un sistema di slitte lineari e angolari;
- I rivelatori: il primo sensore utilizzato è un CCD della Finger Lake Instruments a 16 bit con 512 x 512 a con elementi fotosensibili (pixel) ciascuno della grandezza di 20 μ m, il secondo un CCD U-eye a 8 bit con 1024x768 elementi fotosensibili di grandezza pari a . 4.65 μ m.

2.3 ALLINEAMENTI E METODOLOGIA DI MISURA

L'allineamento della sorgente con il treno di ottiche è stato effettuato coniugando il fuoco anteriore del primo doppietto acromatico con l'uscita della sfera integratrice filtrata spazialmente tramite un pinhole da $100\mu\text{m}$. Il diaframma di apertura è stato posto a metà tra i due doppietti, mentre il CCD è stato posizionato sul fuoco posteriore del secondo doppietto in modo da definire un rapporto di magnificazione pari ad 1 (figura 2.3). Le montature meccaniche delle ottiche e la movimentazione della sorgente sono state regolate fino a ottenere un spot come quello mostrato nella figura 2.2.

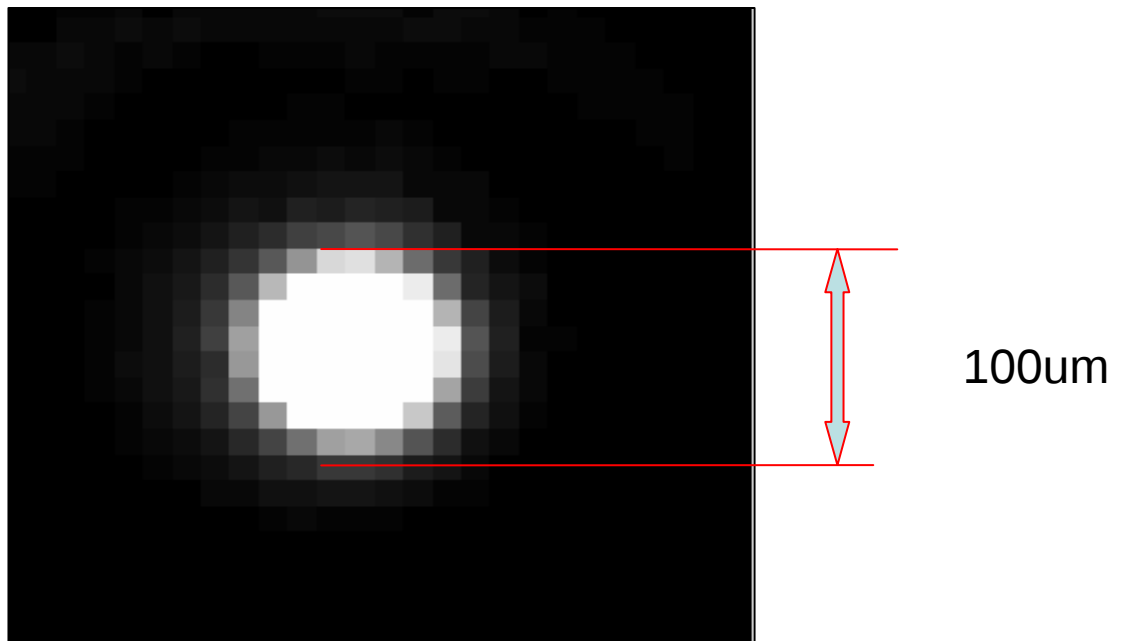


Figura 2.2 Verifica spot di allineamento

Per eseguire le misure, la parte finale dell'arrangiamento è stata successivamente riorganizzata come mostrato nella figura 2.4. Il rivelatore è stato sistemato su una slitta con movimentazione verticale mentre uno specchio di piegamento a 45° è stato incollato su una montatura scamottabile. La testa fibra è stata bloccata su un supporto coassiale all'asse principale dell'ottica mentre l'uscita è stata allineata all'asse del rivelatore più in alto. Questa configurazione ha permesso di acquisire i dati delle fibre e misurare l'apertura relativa ($f/\#$) traslando unicamente il rivelatore.

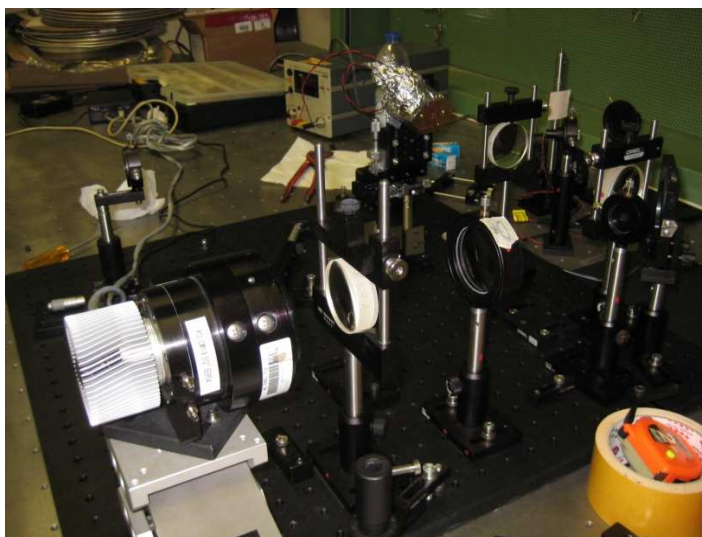


Figura 2.3 Sistema di misura

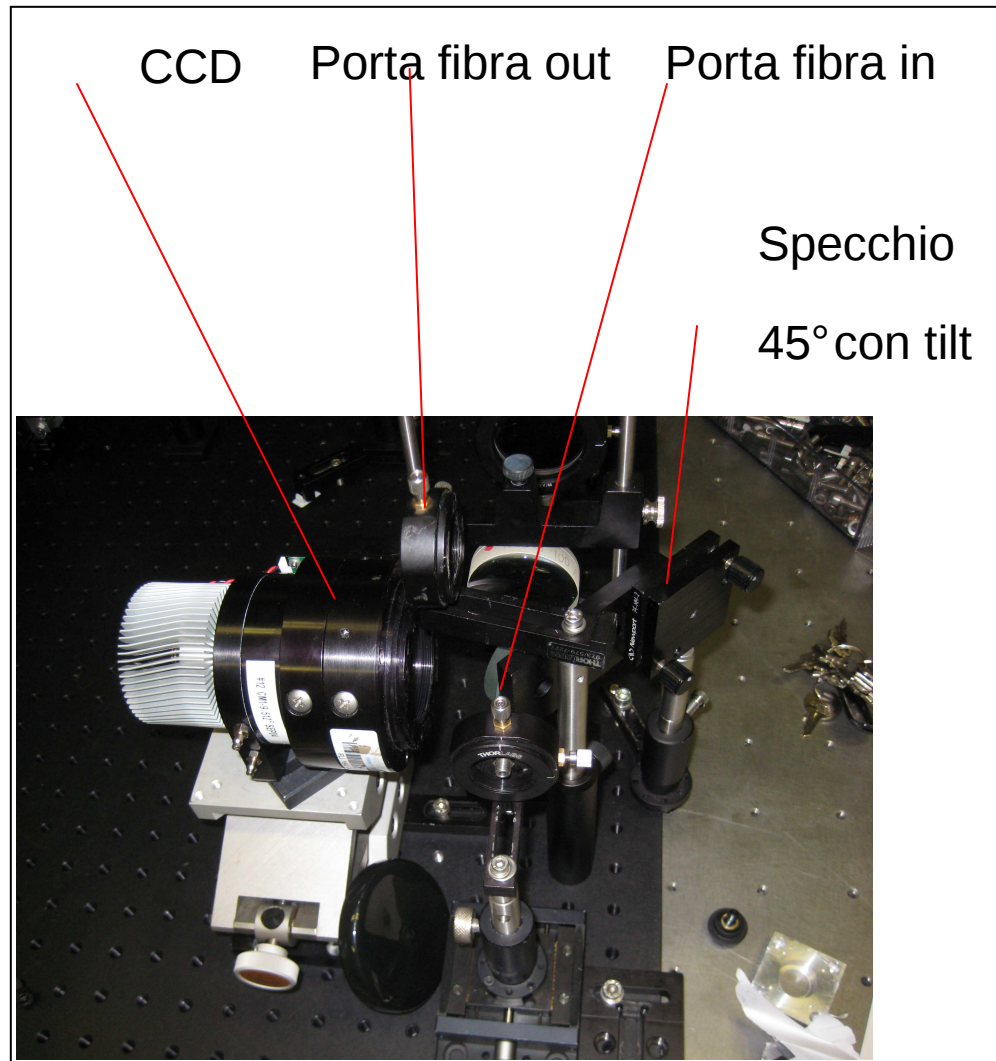


Figura 2.4 Arrangiamento relativo alla parte terminale dell' apparato sperimentale

2.4 FIBRE TESTATE E RISULTATI

Nella tabella seguente sono state raccolte alcune caratteristiche delle fibre testate ed il diametro del pinhole utilizzato durante le acquisizioni. Sono stati poi presentati i grafici del rendimento di trasmissione in funzione dell' apertura relativa e della distribuzione dell'energia in uscita alla fibra come funzione dell' $f/\#$ di uscita (*focal ratio degradation* o FRD).

Codice fibra produttore	Ø Core (μm)	Materiale	NA	Ø pinhole
M27L02	200	quarzo	0.39	Ø 150
M40L02	400	quarzo	0.48	Ø 200
M26L02	550	quarzo	0.22	Ø 400
M41L02	600	quarzo	0.48	Ø 500
M30L02	1000	quarzo	0.39	Ø 800

Tab. 2.1 Caratteristica delle fibre testate

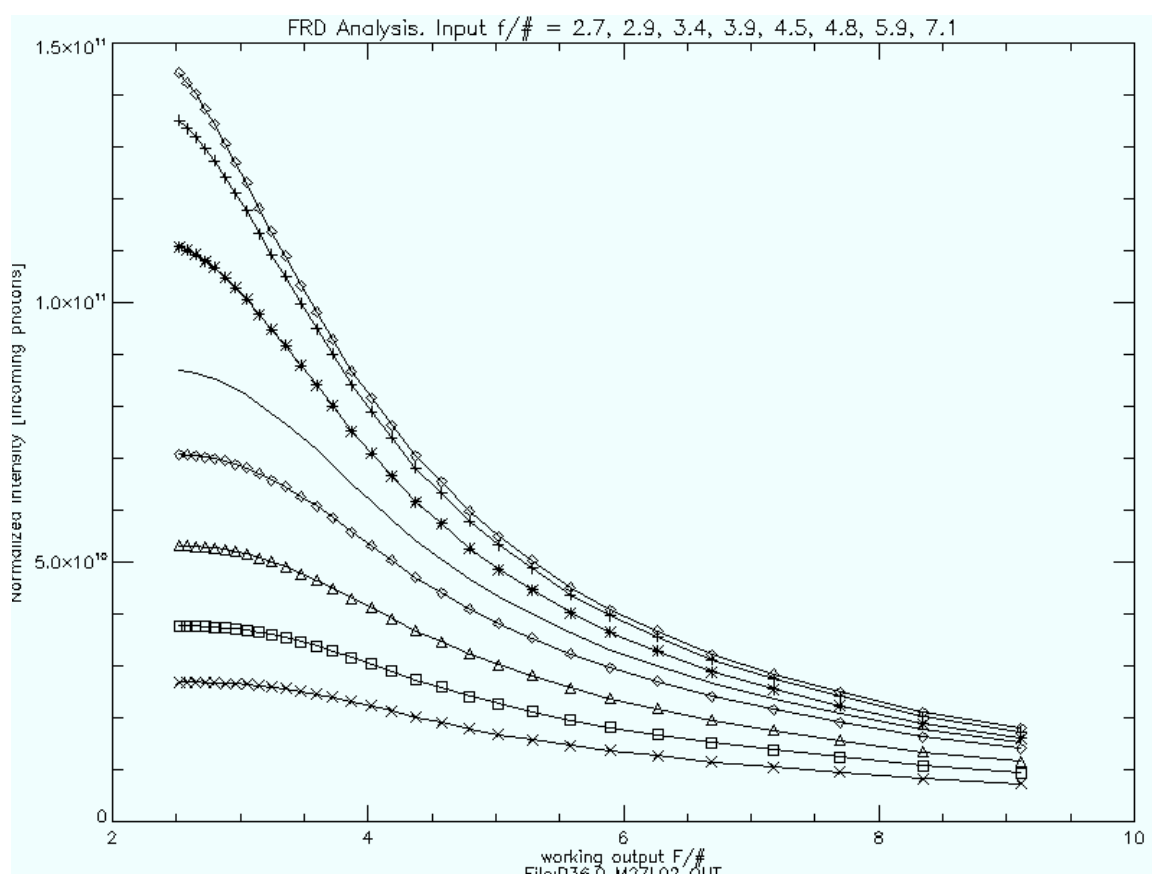


Figura 2.5 Andamento FRD per la fibra con Ø core 200 μm

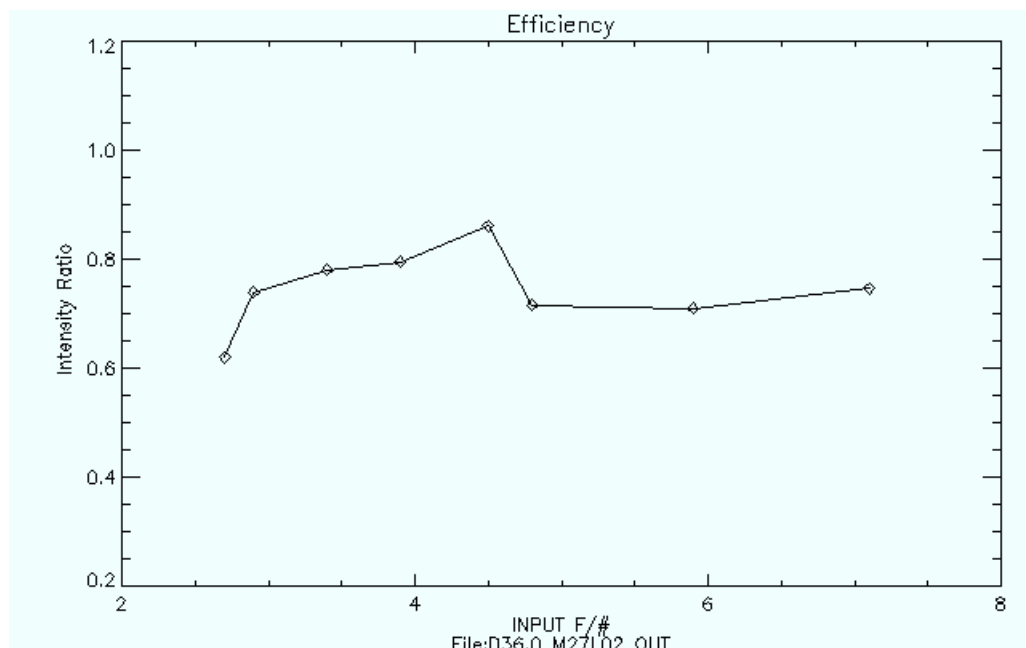


Figura 2.6 Efficienza di trasmissione per la fibra con Ø core 200µm

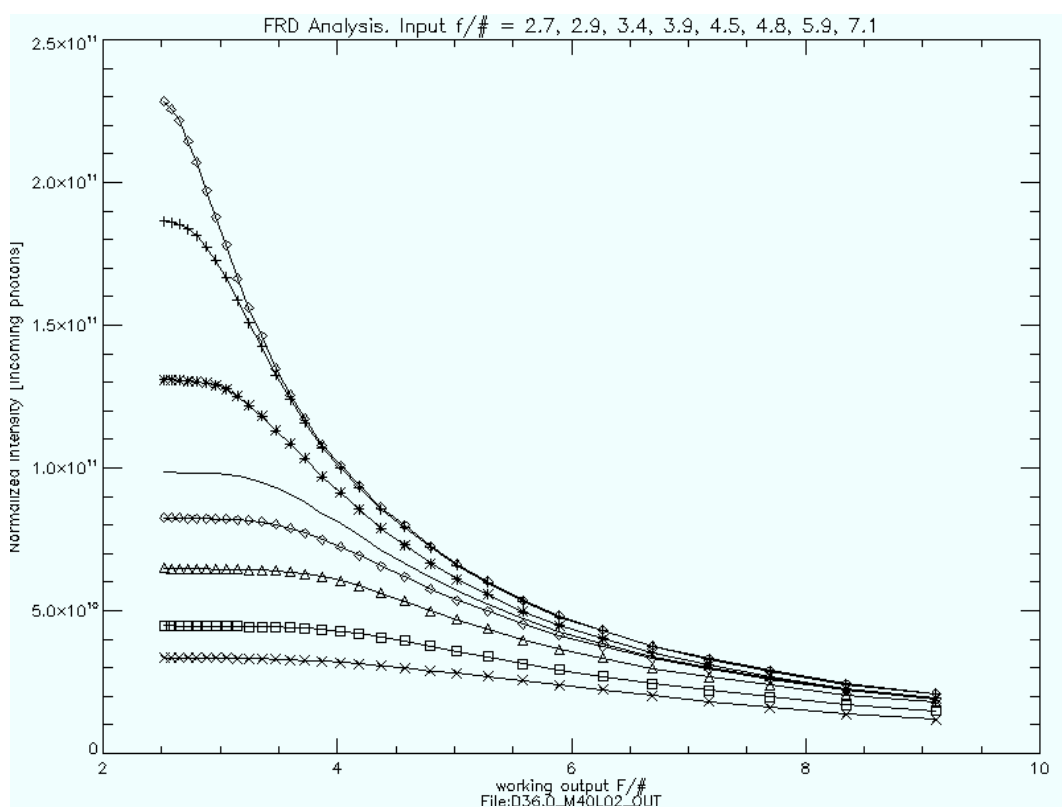


Figura 2.7 Andamento FRD per la fibra Ø core 400µm

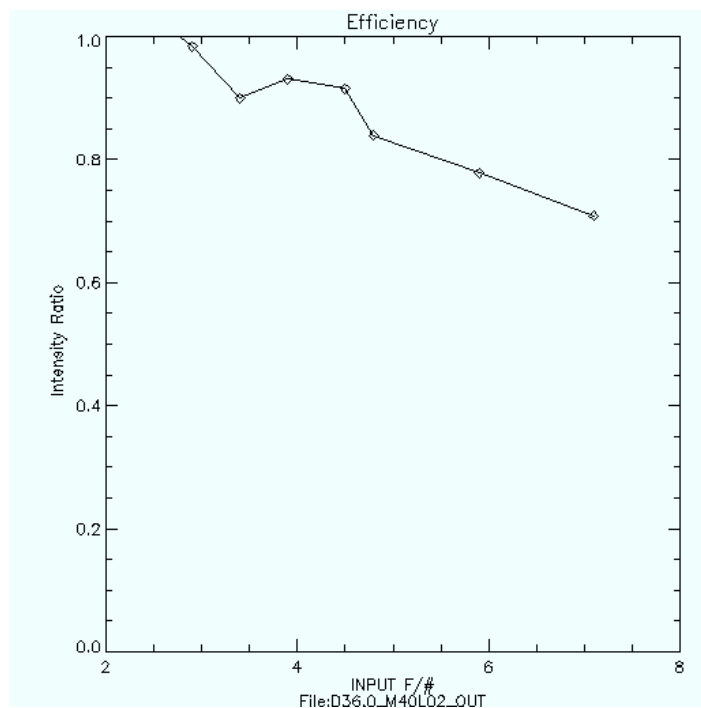


Figura 2.8 Efficienza di trasmissione per la fibra con Ø core 400µm

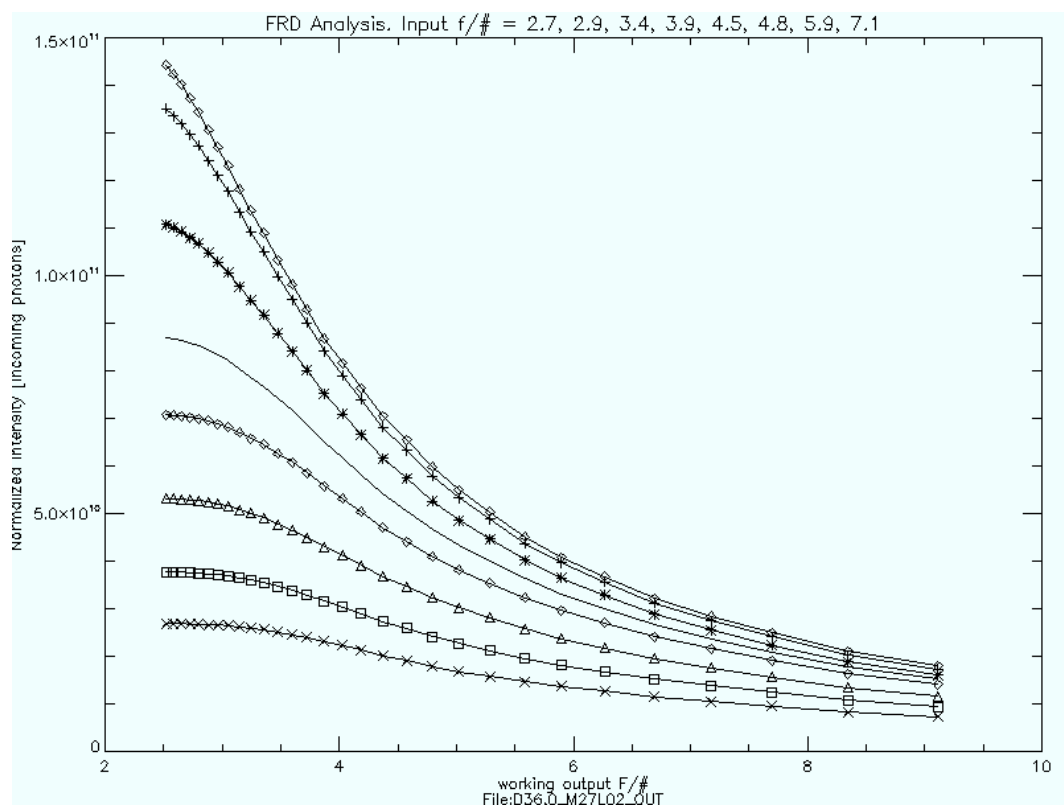


Figura 2.9 Andamento FRD per la fibra con Ø core 600µm

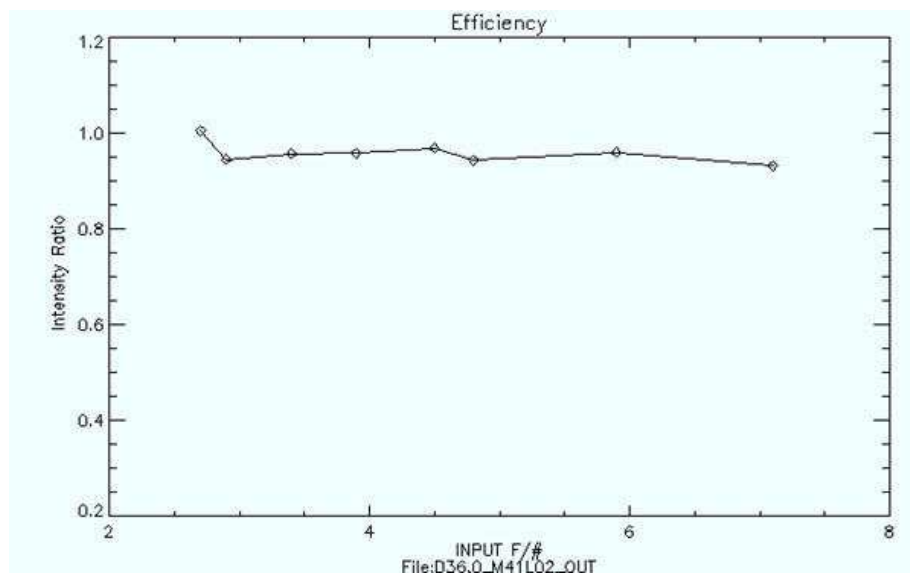


Figura 2.10 Efficienza di trasmissione per la fibra con Ø core 600µm

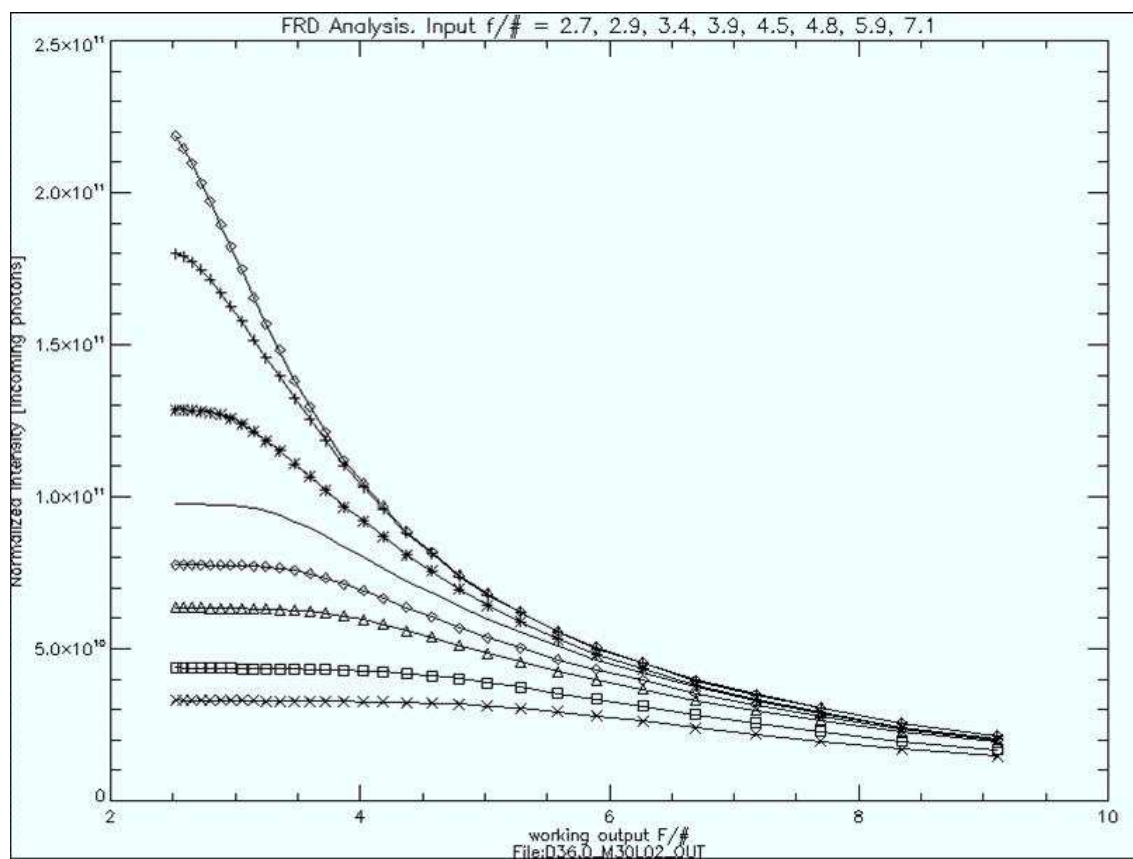


Figura 2.11 Andamento FRD per la fibra con Ø core 1000µm

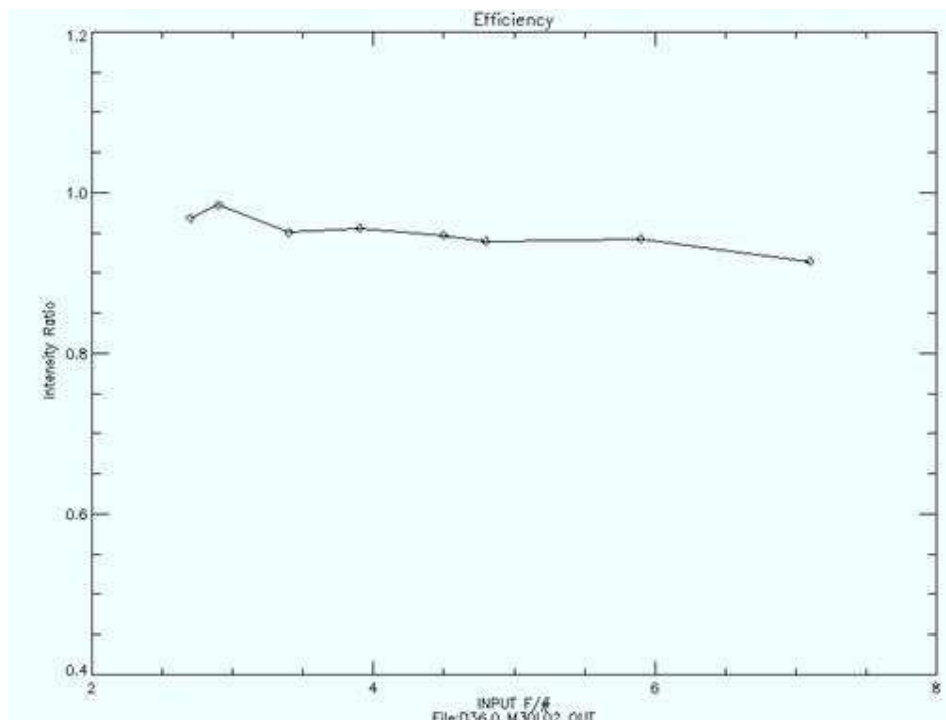


Figura 2.12 Efficienza di trasmissione per la fibra con Ø core 1000µm

2.5 ERRORI DI ALLINEAMENTO

Utilizzando lo stesso arrangiamento sperimentale posto nella condizione di massima efficienza di trasmissione sono state misurate le variazioni di potenza con un power meter (Ophir Laser star) per stabilire una correlazione con eventuali errori di disallineamento.

Il sistema di slitte a cui è stata ancorata la testa della fibra ha permesso di prendere in considerazione i quattro casi possibili: un decentramento in due direzioni parallele ed ortogonali tra loro rispetto al fuoco dove è stata re-immaginata la sorgente, uno sfuocamento ottenuto traslando lungo l'asse principale la fibra ed una inclinazione tra il piano contenente la testa di quest' ultima e il piano focale dell' ottica. I dati riportati in seguito fanno riferimento alle due fibre M41L02 (Ø600 µm) M30L02 (Ø1000 µm).

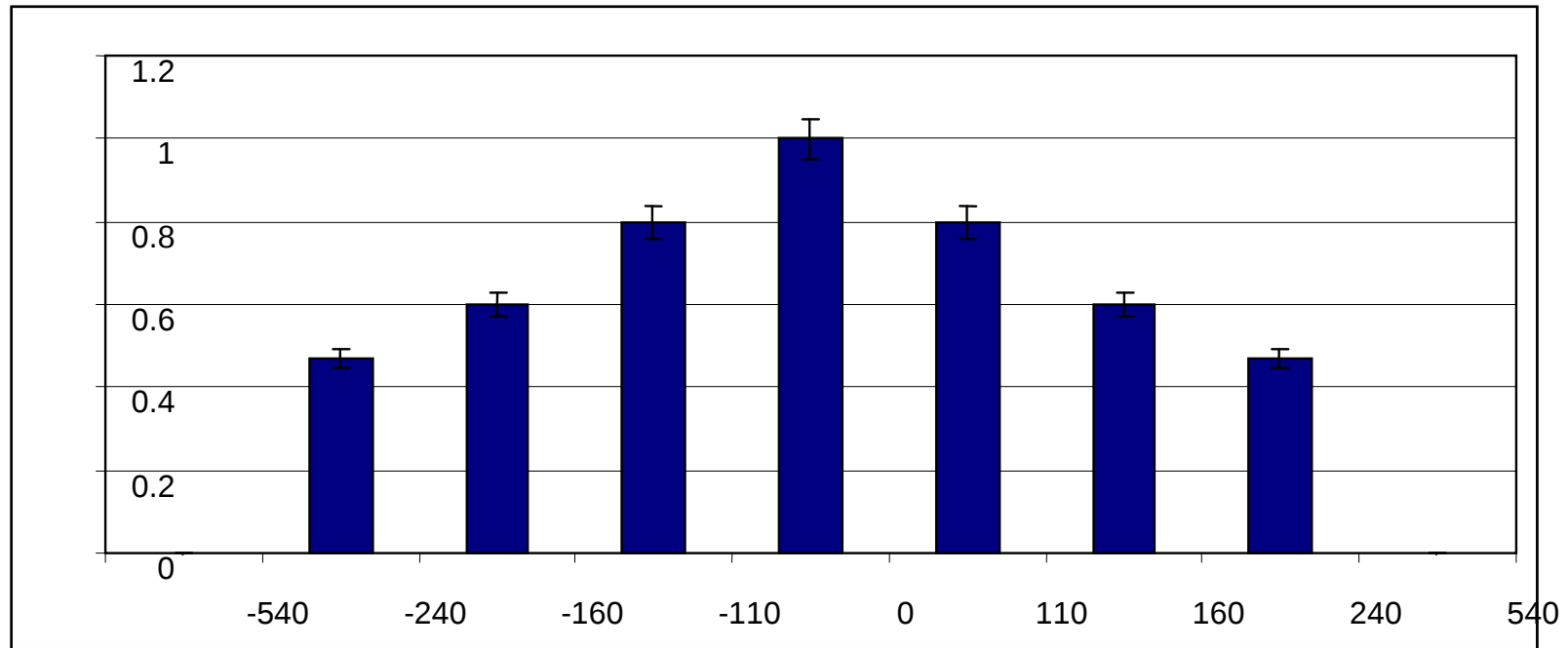


Figura 2.13 Decentramento lungo l'asse X della fibra con Ø core 600µm

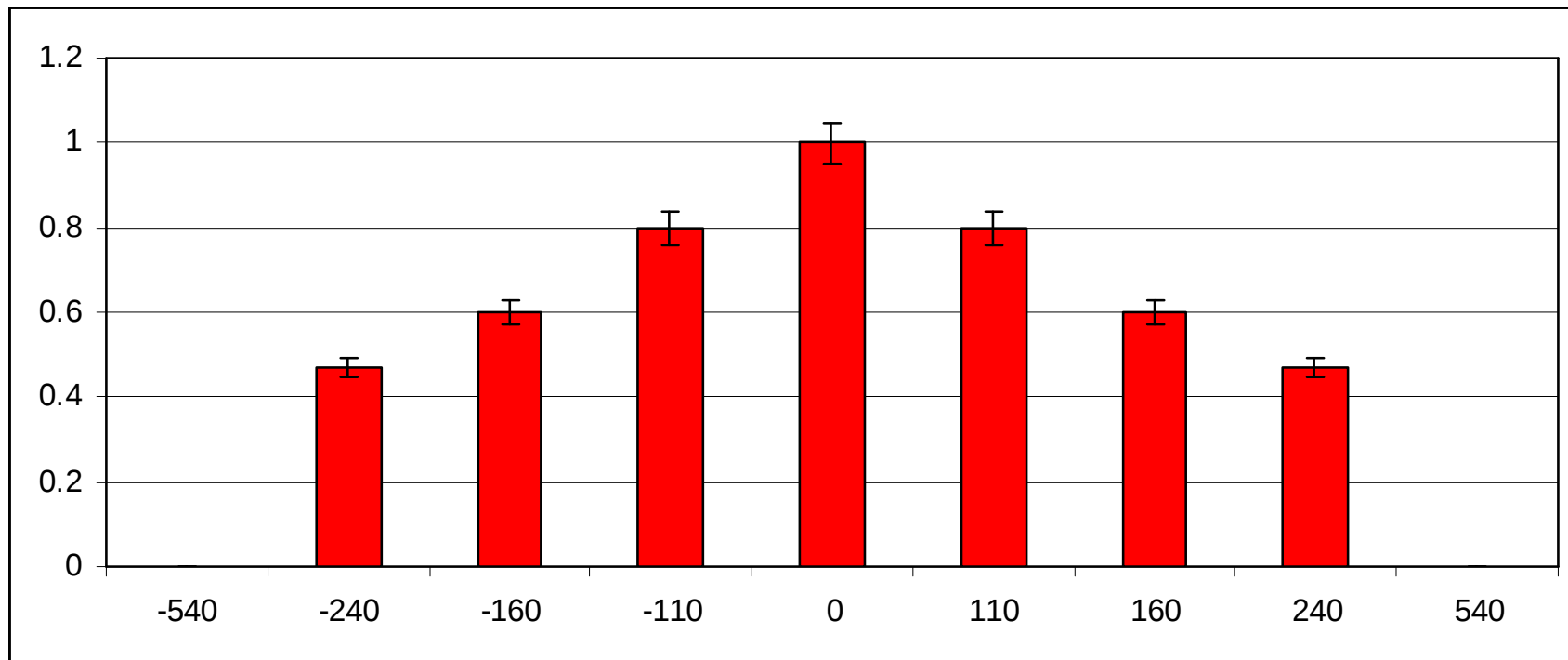


Figura 2.14 Decentramento lungo l'asse Y della fibra con Ø core 600µm

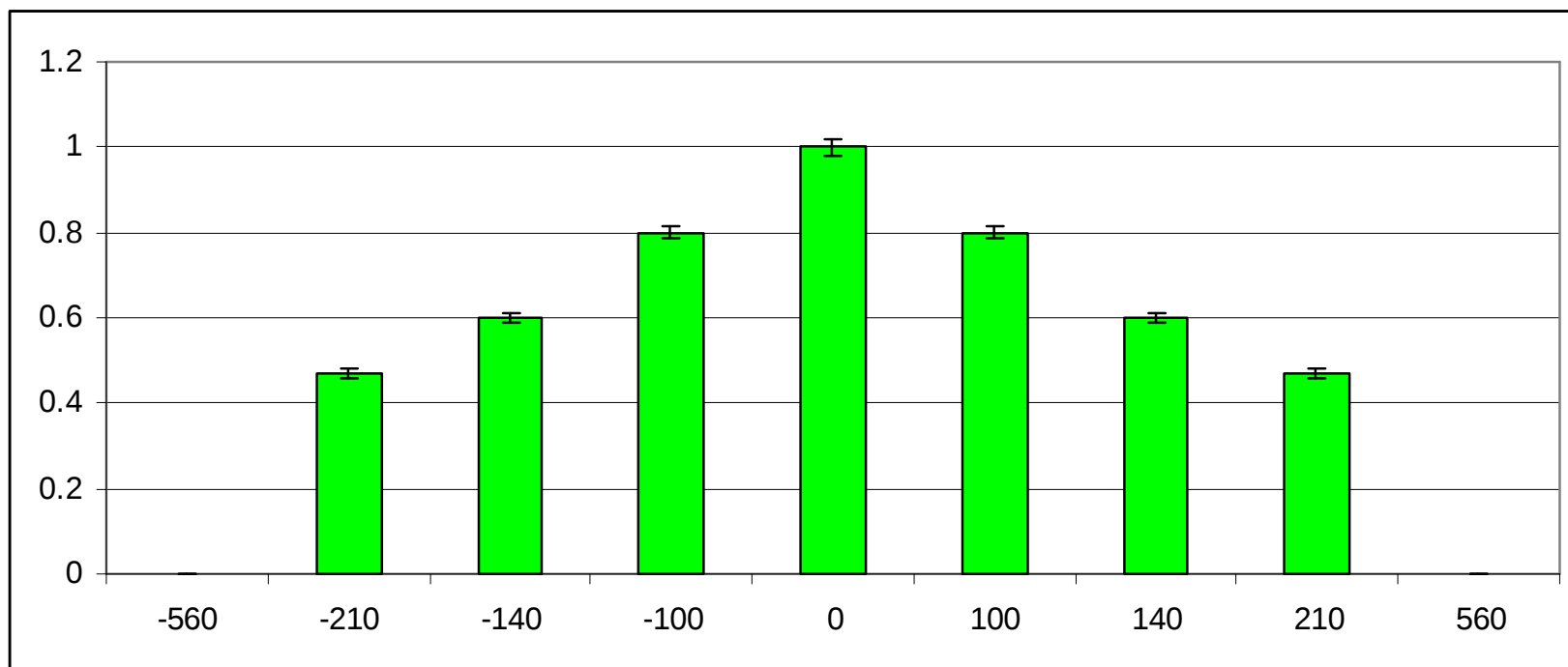


Figura 2.15 Defocus asse Z della fibra con Ø core 600µm

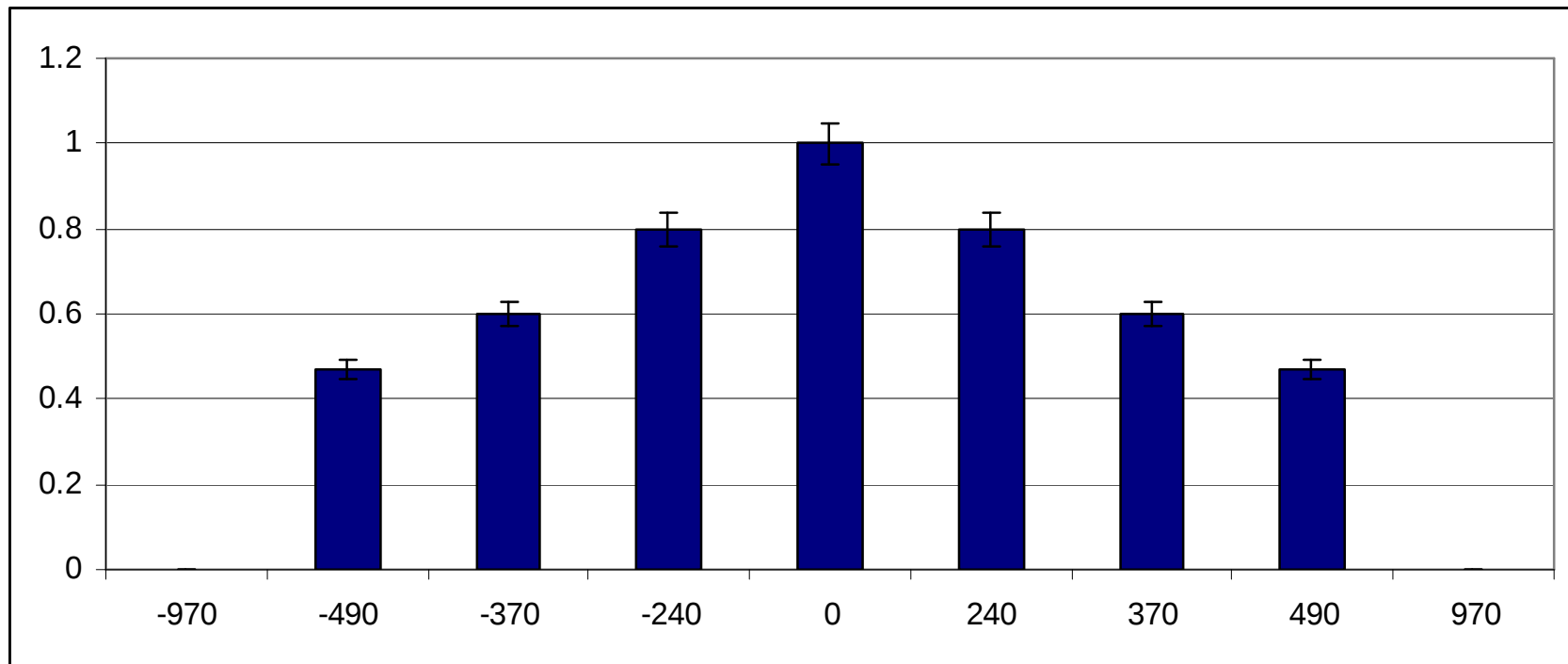


Figura 2.16 Decentramento lungo l'asse X della fibra con Ø core 1000µm

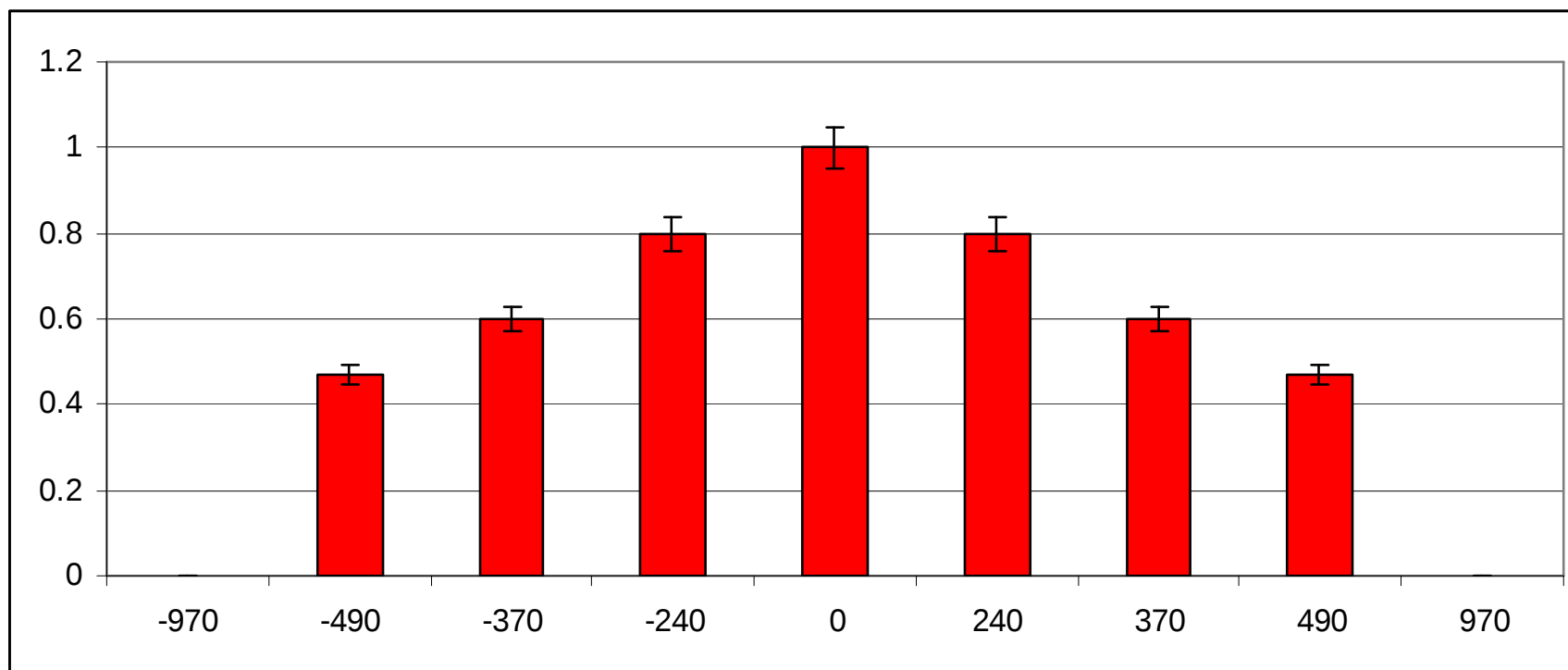


Figura 2.17 Decentramento lungo l'asse Y della fibra con Ø core 1000µm

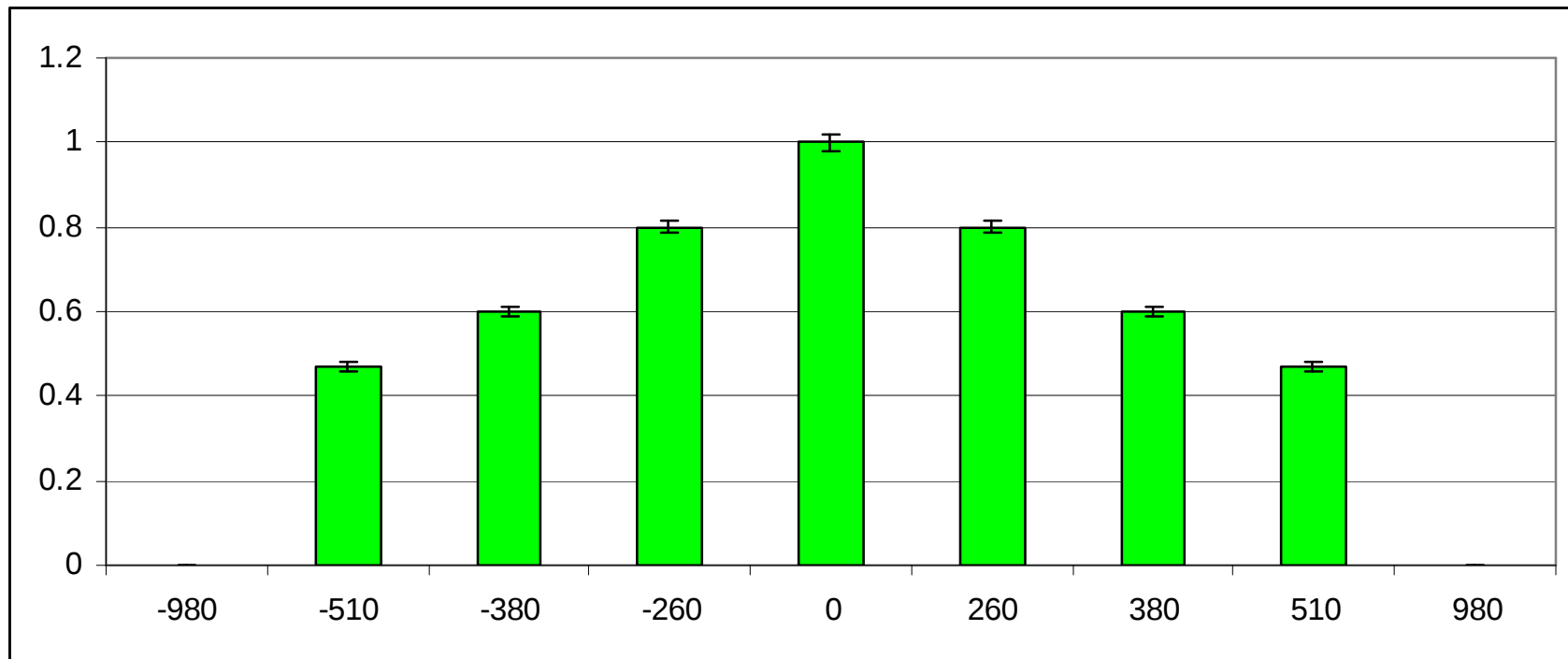


Figura 2.18 Defocus asse Z della fibra con Ø core 1000µm

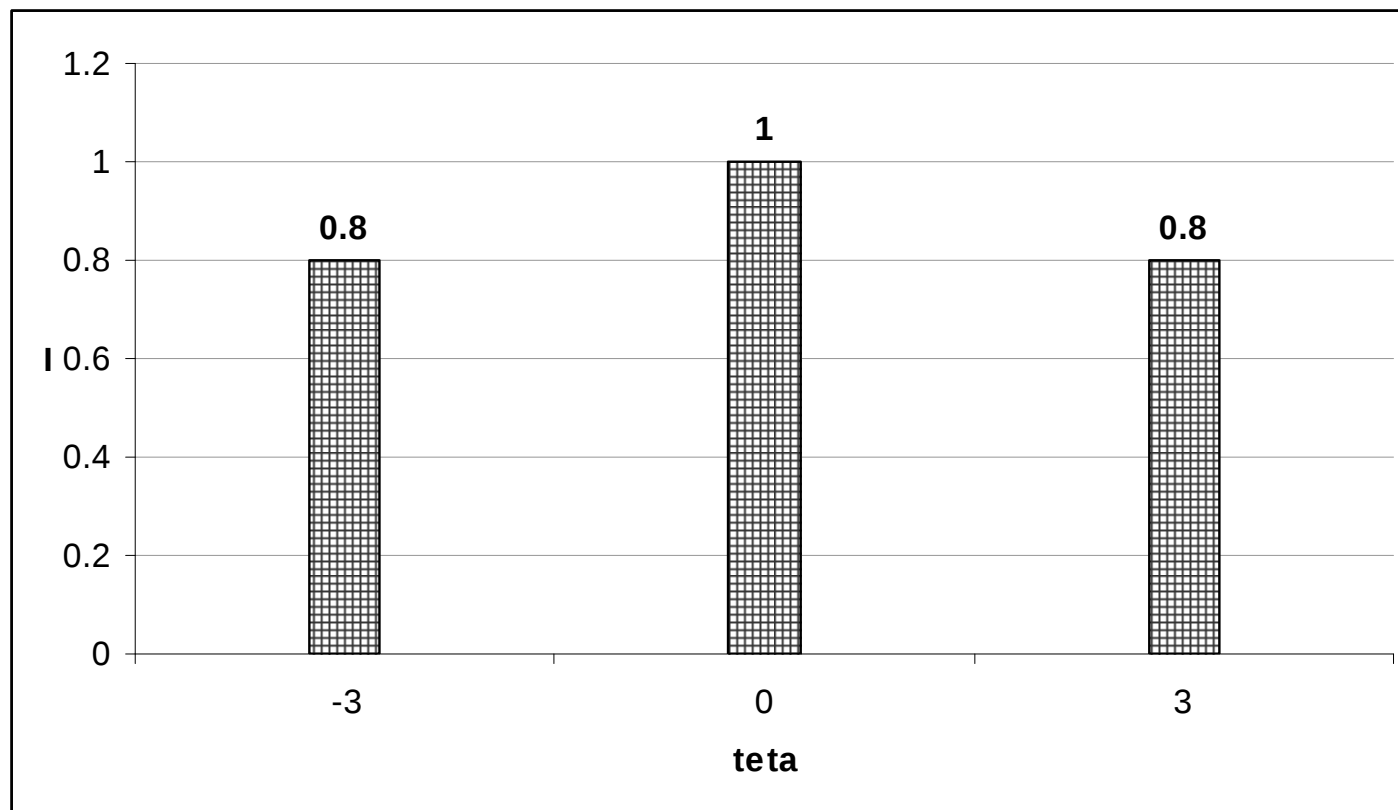


Figura 2.19 Tilt della fibra con Ø core 600µm e 1000 µm

I risultati ottenuti per entrambe le fibre testate mettono in evidenza un dimezzamento dell'efficienza simmetrico rispetto al decentramento per valori di 240 e 490 μm mentre è stata riscontrata una maggiore tolleranza verso difetti di sfocamento. Gli errori di tilt invece, anche considerando le risoluzioni dei dispositivi di inseguimento ad oggi utilizzati e costruibili a basso costo, possono essere trascurati. La sintesi dei risultati ricavati da queste prove hanno indicato come 110 e 240 μm il massimo dei disallinamenti totali possibili al fine di ottenere un'efficienza di trasmissione minima equivalente all'0.8 sfruttando fibre con un diametro del core equivalente a 1000 μm .

2.6 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La metodologia adottata per lo studio delle fibre ottiche individuate per il trasporto della radiazione visibile, ha permesso di definire le caratteristiche di trasmissione di questi dispositivi relazionandole ad alcune peculiarità delle ottiche di raccolta. Un'analisi delle immagini dei dati ottenuti ha permesso inoltre di analizzare la distribuzione di energia a valle del sistema.

Le fibre con un diametro del core di 600 e 1000 μm , hanno riportato i rendimenti medi più elevati. I grafici illustrati nelle figure 2.9 e 2.11 infatti, mostrano un valore praticamente costante compreso tra 0.8 e 0.9 per tutte le aperture con un picco di trasmissione di circa 0.95 per $f/\#$ equivalenti a 2.7 e 2.9. Le due fibre ottiche con diametri minori sono invece caratterizzate da un andamento non uniforme rispetto all'apertura, pur presentando anch'esse dei picchi compresi tra 0.8 e 0.9. Questo dato è imputabile alle peculiarità delle fibre stesse e, risulta essere amplificato ulteriormente dall'arrangiamento ottico progettato. La semplicità delle componenti adottate, scelte coerentemente con le caratteristiche di un sistema finalizzato ad applicazioni *solari*, pone infatti dei limiti al potere risolutivo e alla capacità di concentrazione del sistema. Le risorse necessarie per un miglioramento di queste prestazioni non riescono tuttavia ad essere bilanciate dall'economicità e dalla maggiore resistenza ad eventuali stress meccanici in favore di fibre aventi un core piccolo. La sintesi dei risultati ottenuti restringe quindi il campo di scelta a due fibre, tra quelle individuate: quelle aventi diametro del core di 600 e 1.000 μm . Su questi due dispositivi inoltre sono stati valutati

l'influenza di errori di allineamento rispetto alla sorgente. I risultati ottenuti hanno permesso di definire un'insieme tolleranze globali facilmente raggiungibili nei sistemi optomeccanici adottati per il solare, in particolare nel caso della fibra con core di 1000 μm .

L'analisi dei grafici rappresentativi della FRD definisce una distribuzione dell'energia funzione dell'angolo di uscita. Questo dato risulta essere uniforme per tutti i dispositivi testati ed integra la base di partenza necessaria per la progettazione di un eventuale diffusore da integrare nel sistema.

3 - ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI E VERIFICA SPERIMENTALE DI UNA FIBRA OTTICA

3.1 INTRODUZIONE

Nel capitolo precedente, utilizzando un arrangiamento sperimentale, sono state analizzate le caratteristiche di trasmissione di diverse fibre ottiche adatte per il trasporto della luce visibile. La sintesi dei dati ha individuato, tra quelle selezionate, una fibra in quarzo con un core di 1000 μm come la più adatta allo scopo sia per il rendimento, che per le tolleranze ammissibili rispetto al suo accoppiamento con le ottiche di focalizzazione.

In questo capitolo, sono stati presentati i risultati delle analisi effettuate su un modello numerico rappresentativo di questo dispositivo. Questo approccio, inoltre, ha permesso di definire le temperature di esercizio dell'intero sistema altrimenti difficilmente quantificabili, valutando, simultaneamente, eventuali ed ulteriori effetti, indotti dalle sollecitazioni termiche.

I risultati estrapolati sul modello numerico sono stati validati attraverso un sistema sperimentale costruito in laboratorio.

3.2 DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO

Il modello rappresentativo del sistema è composto da tre elementi principali: il core della fibra in quarzo, il suo rivestimento superficiale ed una montatura meccanica. Sull'ingresso dell'elemento ottico è stata simulata la proiezione di una densità di potenza equivalente a quelle che è possibile focalizzare tramite i concentratori solari. L'aria che circonda il sistema è stata schematizzata attraverso un cilindro, i cui estremi identificano rispettivamente l'ingresso e l'uscita dei flussi. Le dimensioni di questa modellizzazione sono state fissate in modo tale da garantire una adeguata rappresentazione dei moti all'interno del modello. Per il fluido sono state prese in esame

condizioni laminari e turbolente, valutando anche le risposte temporali dei sistemi. Sfruttando la struttura assial-simmetrica del sistema, la geometria simulata è stata ridotta ad un modello bidimensionale con una importante riduzione dei tempi di calcolo.

Una rappresentazione del sistema descritto è stata riportata nella figura 3.1: i due cilindri coassiali, F ed H, rappresentano la fibra e il rivestimento superficiale mentre G identifica la montatura meccanica.

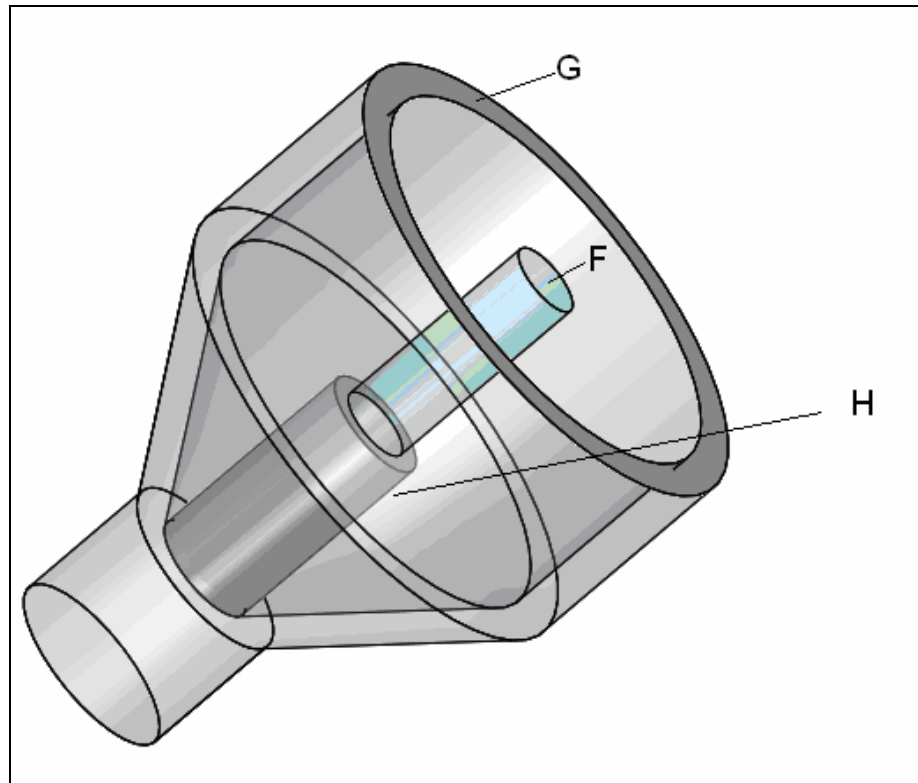


Figura 3.1 Rappresentazione tridimensionale dell' assieme.

3.3 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E PROPRIETÀ FISICHE

Nella figura 3.2 è rappresentato il modello proposto per l'analisi ed i punti di campionamento della temperatura, mentre le tabelle 3.1, 3.2 e 3.3 sono riportati i materiali degli elementi del sistema e le loro caratteristiche fisiche.

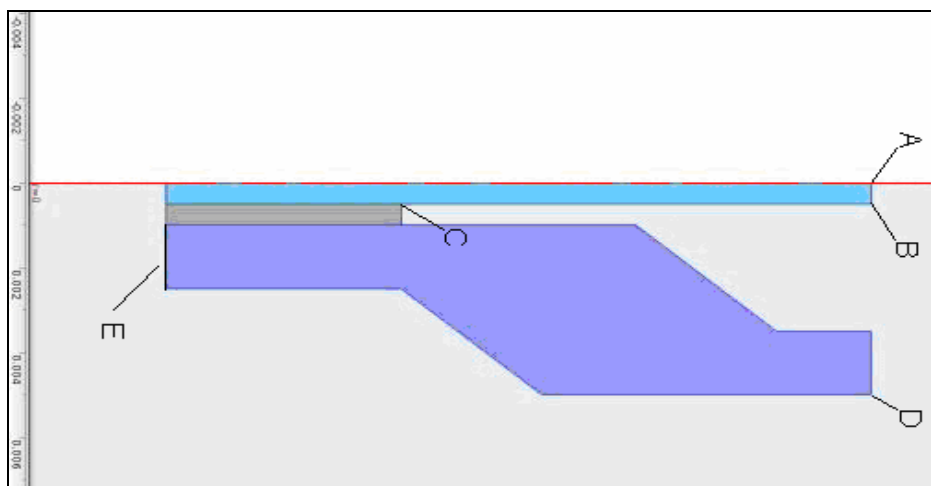


Figura 3.2 Sezione assiale del modello. I punti di campionamento della temperatura sono stati posti in prossimità della testa della fibra(A e B), del rivestimento superficiale (C) e sulla montatura meccanica (D). Il punto E rappresenta il vincolo triassiale dell' assieme per l'analisi delle sollecitazioni meccaniche.

Elementi	Larghezza; Altezza [m]
Fused silica core	5x10 ⁻⁴ ; 15x10 ⁻³
Rivestimento in silicone	5x10 ⁻⁴ ; 5x10 ⁻³
Superficie d'aria	0.24; 0.48

Tabella 3.1 Caratteristiche geometriche

Proprietà	Unità di misura	Valore
Coefficiente d'espansione termica	1/K	4.6x10 ⁻⁶
Capacità termica	J/(Kg·K)	728
Conducibilità termica	W/(m·K)	1.35
Modulo di Young	Pa	73.6x10 ⁹

Modulo di Poisson		0.17
Densità	Kg/m ³	2210
Emissività		0.96
Assorbività		0.02

Tabella 3.2 Proprietà della fibra ottica

Proprietà	Unità di misura	Valore
Coefficiente d'espansione termica	1/K	3.4x10 ⁻⁶
Capacità termica	J/(Kg·K)	810
Conduttività termica	W/(m·K)	0.2
Modulo di Young	Pa	5.79x10 ⁹
Modulo di Poisson		0.27
Densità	Kg/m ³	1000
Emissività		0.96
Assorbività		0.90

Tabella 3.3 Proprietà del rivestimento di silicone

I dati e le caratteristiche relativi all'aria e all'alluminio utilizzati per la montatura sono state presi in bibliografia [33], [34] .

3.4 MESHES

La geometria è stata rappresentata attraverso due mesh non strutturate.

La prima, costituita da circa 2700 elementi, è stata quella utilizzata per descrivere il sistema assumendo l'ambiente intorno alla fibra e alla sua montatura in condizioni laminari. Opportuni incrementi alla discretizzazione sono stati operati nella zona intorno alla fibra ottica e al suo rivestimento superficiale (fig. 3.3) al fine di descriverne il comportamento rispetto alle sollecitazioni indotte in maniera corretta.

Una seconda mesh, costituita da circa 100000 elementi, è stata costruita invece per rappresentare il sistema considerando i flussi in condizioni di regime turbolento. La modellizzazione di queste condizioni, ha comportato la necessità di incrementare notevolmente la discretizzazione del rettangolo con cui è stata rappresentata l'aria, per rispondere ai problemi di convergenza che si sono presentati durante il calcolo delle simulazioni.

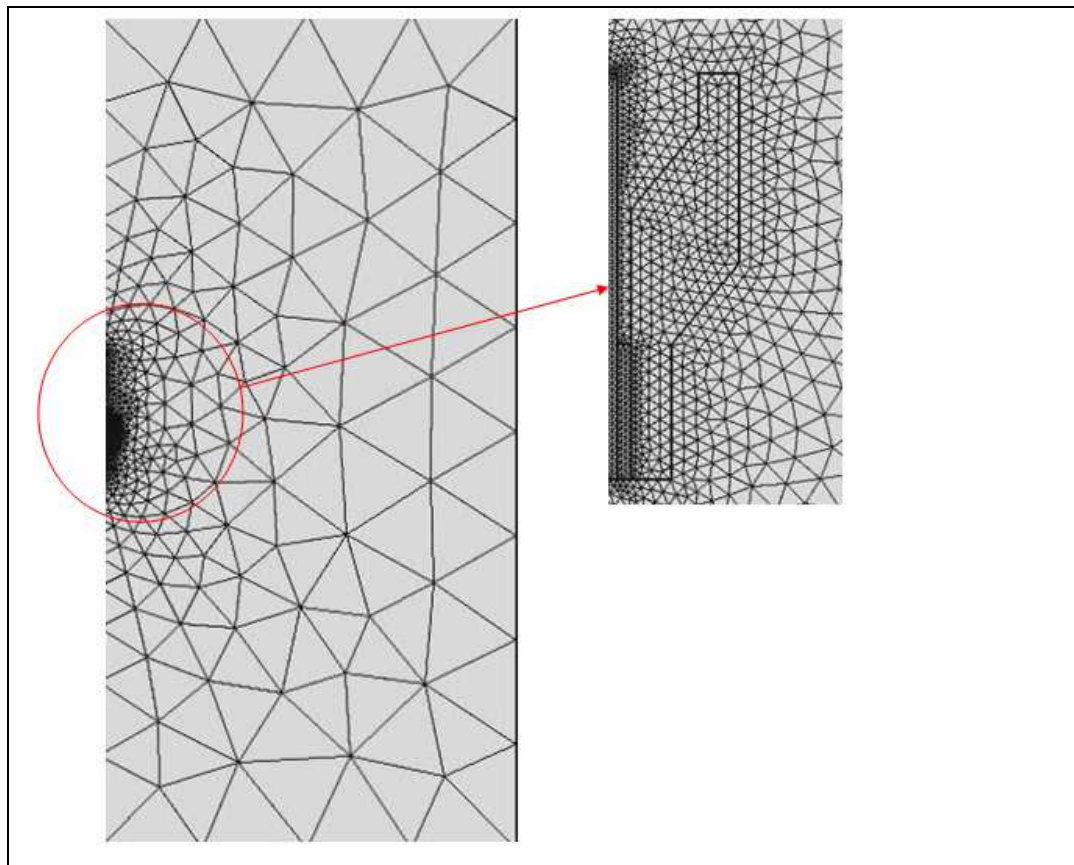


Figura 3.3 Discretizzazione del modello per le simulazioni in regime laminare

3.5 DATI INIZIALI PER LE SIMULAZIONI

Le analisi condotte sul modello costruito sono state effettuate prendendo in considerazione tre possibili potenze trasferite sulla fibra ottica dal sistema di raccolta della luce. Il rapporto, CR (concentration ratio) tra l'area della testa della fibra e la superficie di raccolta del collettore solare, considerando l'irradianza media al suolo di 1000W/m^2 , ha definito la quantità di potenza focalizzata ed iniettata. Sono stati considerati tre possibili rapporti: 750, 1500 e 3000. Gli altri valori iniziali sono stati riportati nella tabella 3.4.

Valore	Unità di misura	Valore (laminare /turbolento)
Velocità del vento	m/s	0.005/10
Irradianza media al suolo	W/m ²	1000
Temperatura ambiente	K	293
Pressione ambiente	bar	1

Tabella 3.4 Valori iniziali

I confini della superficie con cui è stata schematizzata l'aria sono stati considerati non isolati e la temperatura iniziale dell'intero sistema è stata fissata a 293K.

3.6 APPROCCIO NUMERICO

Il sistema è stato modellizzato secondo un approccio multifisico; gli scambi convettivi, radiativi e conduttivi oltre che le conseguenti sollecitazioni indotte sono state valutate simultaneamente per entrambi gli stati del sistema valutati: laminare e turbolento. La differenziazione tra i due casi e l'approccio numerico utilizzato è basato sulla stima del numero di Reynolds [35] e sulle equazioni descritte di seguito.

3.6.1 Flusso laminare

Queste simulazioni sono state effettuate considerando l'aria come non isoterma e comprimibile. Il comportamento del fluido e gli scambi termici sono stati descritti attraverso la coppia di equazioni riportata di seguito [36].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) + \mathbf{F}$$

[1]

La prima descrive l'equazione di continuità mentre la seconda rappresenta l'equazione dei momenti in cui $\mathbf{F}$ è il contributo delle forze di volume. Gli scambi termici nel fluido sono stati descritti tramite l'equazione [2] in cui il termine di scambio viscoso e quello relativo alla pressione sono stati trascurati.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + Q$$

[2]

Lo scambio radiativo tra la sorgente e la fibra è stato invece descritto da

$$J = \rho G + \varepsilon \sigma T^4$$

[3]

dove ε è l'emissività superficiale, ρ la sua assorbività G l'irraggiamento e J la radianza. L'analisi meccanica per la determinazione degli spostamenti è stata effettuata utilizzando i risultati dell'analisi termica sia per le simulazioni stazionarie che per quelle dipendenti dal tempo. La tabella 3.5 riassume i tempi di calcolo impiegati per le varie simulazioni e i gradi di libertà relativi. Il solutore adottato in tutti i casi trattati in regime laminare è di tipo diretto [37].

CR	750	1500	3000
CPU time [s] (Steady state/ Time dependent)	41/342	41/78	41/94
DOF	8700	8700	8700

Tabella 3.5 Tempo di calcolo e numero di gradi libertà- regime laminare

3.6.2 Regime turbolento

Il regime turbolento è stato riprodotto, per tutti i casi presi in esame, attraverso il modello, $K-\varepsilon$ [38] e descrivendo la conduttività turbolenta attraverso la schematizzazione proposta da Kays- Crawford [39].

$$Pr_T = \left(\frac{1}{2Pr_{T\infty}} + \frac{0.3}{\sqrt{Pr_{T\infty}}} \cdot \frac{C_p \mu_T}{\lambda} - \left(0.3 \frac{C_p \mu_T}{\lambda} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{\lambda}{0.2 C_p \mu_T \sqrt{Pr_{T\infty}}}} \right) \right)^{-1}$$

[4]

Il numero di Prantl è stato definito attraverso la relazione precedente, dove λ rappresenta la conduttività termica e $Pr_{T\infty} = 0.85$. La modellizzazione delle regioni adiacenti alla pareti della fibra e a quelle del rivestimento superficiale, sono state modificate introducendo delle funzioni di parete [40] così come la discretizzazione nelle

regioni di ingresso e uscita [41-44]. Questa modifica si è resa necessaria per valutare correttamente in queste zone la risposta del sistema.

La tabella 3.6 riassume i tempi di calcolo impiegati per le varie simulazioni e i gradi di libertà relativi.

CR	750	1500	3000
CPU time [s]	12073 5	12125	1257 6
DOF	36000 0	36000 0	3600 00

Tabella 3.6 Tempo di calcolo e numero di gradi libertà- regime turbolento

3.7 ARRANGIAMENTO SPERIMENTALE

La validazione del modello numerico ha reso necessaria la progettazione di un arrangiamento sperimentale in laboratorio attraverso il quale riprodurre una condizione di funzionamento, in scala, rappresentativa della realtà.

Il sistema utilizza come sorgente una lampada alogena di circa 150W (SVX 1530 della Muller Elektronik-Optik), focalizzata e filtrata spazialmente da un pinhole di 1000 μ m collocato nel primo fuoco del sistema. Questo fuoco è stato reimmaginato sulla testa della fibra attraverso un'ottica costituita da due doppietti con trattamento antiriflesso aventi focale $f=100$ mm e diametro $\varnothing=50.8$ mm. Lo schema ottico proposto, privo di ulteriori diaframmi di apertura, è caratterizzato da un $f/\#$ di 2.9 che ha permesso di far lavorare la fibra con una trasmissione di 0.95 (Cap.2). Ottimizzando il posizionamento tra i componenti delle ottiche il diametro del fuoco del sistema è stato ridotto ad 1.2mm con una potenza misurata di $130 \cdot 10^{-3}$ W equivalente ad un CR di circa 95.

La fibra ottica utilizzata, è di tipo commerciale con un core nominale di $1000\mu\text{m}$ e la sua apertura numerica NA è pari a 0.39. Questo dispositivo, per riprodurre in maniera fedele il modello utilizzato nelle simulazioni, è stato sbucciato dei rivestimenti superficiali, lasciando così il quarzo in contatto diretto con l'aria. Il dispositivo è stato fissato alle slitte per la movimentazione attraverso una montatura meccanica e bloccato per mezzo di un anello di teflon conico per ridurre al minimo le sollecitazioni.

Le temperature sono state rilevate attraverso i sensori PT111 della Lakeshore posizionati grazie a delle bacchette di plastica e ad appositi fori nella meccanica della montatura. Altre due resistenze, PT-100, sono state utilizzate per monitorare l'aria e la temperatura.

Un'immagine dell'apparato sperimentale progettato è mostrato nella figura 3.4.

Per bilanciare la pressione esercitata dalle resistenze sulla fibra e ridurre al minimo i disallineamenti, la parte terminale della fibra è stata poggiata su un piccolo prisma di vetro con una scanalatura (fig 3.5).

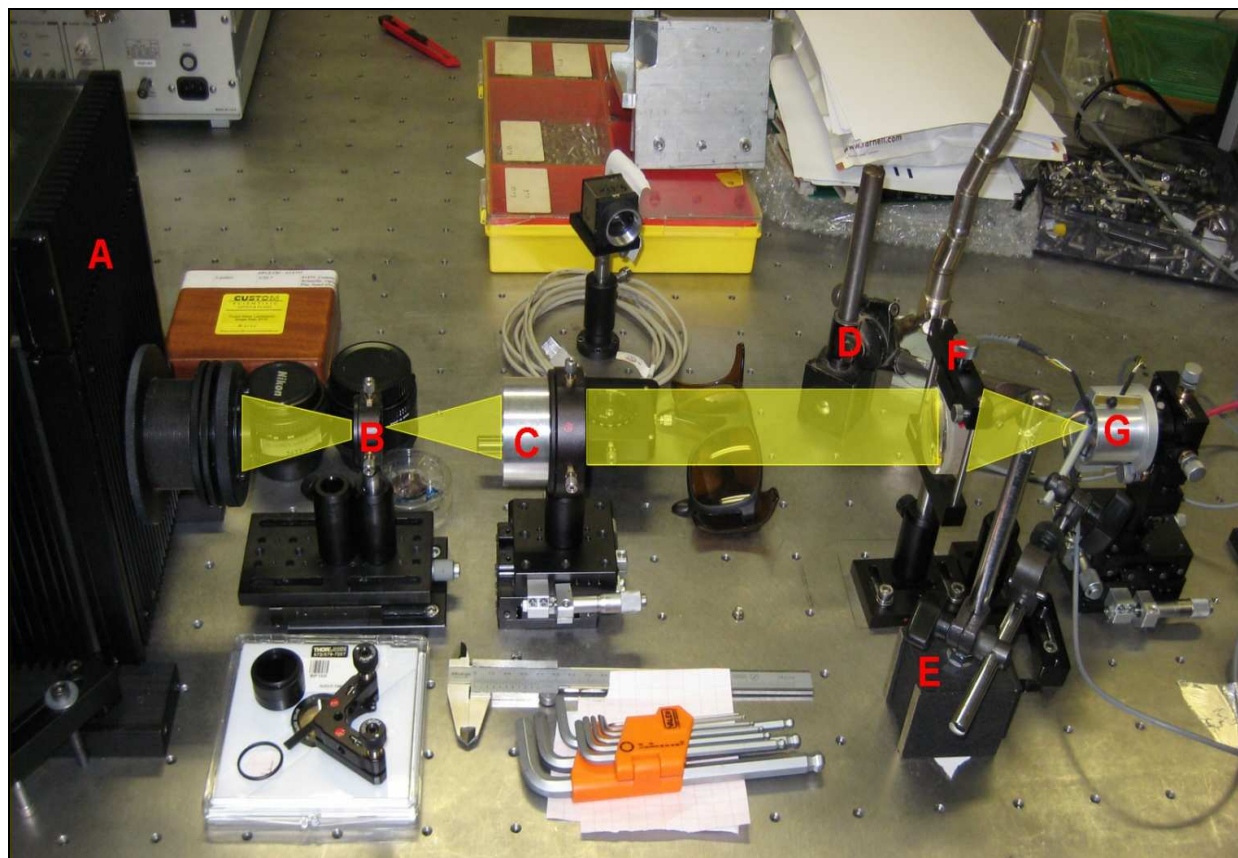


Figura 3.4 L'arrangiamento sperimentale è composto da una lampada Xenon (A) focalizzata tramite un obiettivo sul cui fuoco è stato posto un pinhole(B) utilizzato come filtro spaziale. Questo fuoco è stato reimaginato sulla testa della fibra tramite un sistema ottico costituito da due doppietti con trattamento antiriflesso (C ed F). La fibra è stata bloccata tramite una montatura dedicata (G) e agganciata ad un sistema di slitte per la movimentazione. Lo spot proiettato ha un'area di 1.13mm^2 e la potenza misurata corrisponde a circa 130mW . Le misure di temperatura sono state effettuate tramite sensori PT100 (Lakeshore) appoggiati tramite i supporti e le pinze (D ed E).

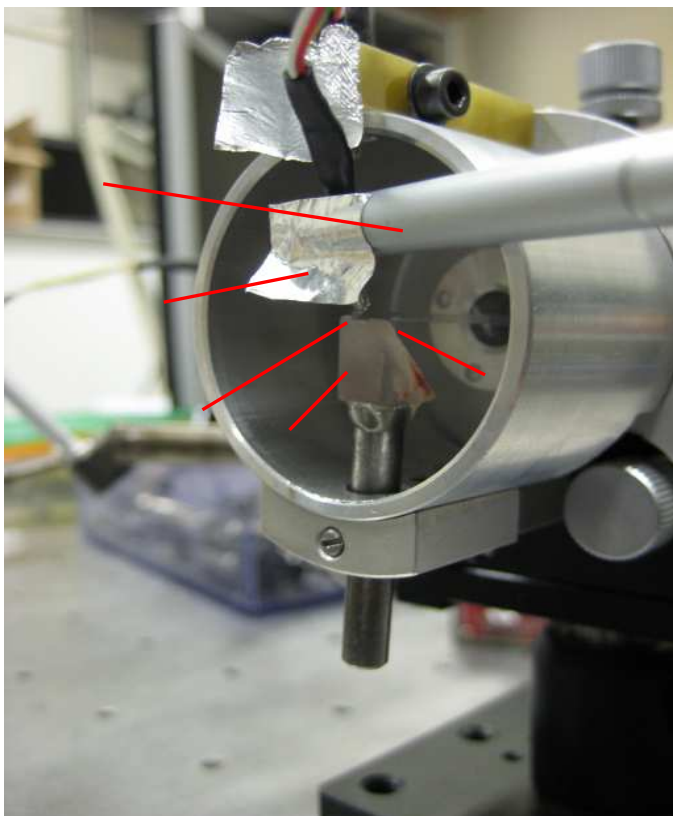


Figura 3.5 Testa della fibra ottica con sensori PT111. Un piccolo prisma (R) è stato posizionato dalla parte opposta al sensore rispetto al core della fibra (S) per compensare lo spostamento causato dall' appoggio del sensore. Una pellicola riflettente (P) incollata alla bacchetta (O) è stata utilizzata per diminuire il contributo dell' irraggiamento sul sensore.

3.8 RISULTATI

In questo paragrafo sono stati riportati i risultati ricavati dalle simulazioni e i dati sperimentali misurati sul sistema. I dati delle deformazioni meccaniche sul modello riprodotto in laboratorio non sono stati misurati in quanto trascurabili.

3.8.1 Simulazioni numeriche in regime laminare

Le temperature dei punti A,B,C e D e i loro spostamenti relativi DP (vedi. Fig 3.2) sono stati riassunti nella tabella 3.7.

CR	A T/DP	B T/DP	C T/DP	D T/DP
750	306.0k/0.19	304.1/0.19	293.7k/0.05	293.6k/0.22
1500	318.9k/0.39	315.1/0.38	294.4/0.18	294.2k/0.44
3000	343.9k/0.77	336.2/0.76	295.7k/0.21	295.4k/0.88

Tabella 3.7 Temperature dei punti di controllo e spostamenti relativi in condizioni laminari.

Le simulazioni calcolate in regime transitorio, relative alle tre ipotesi di concentrazione, hanno mostrato una stabilizzazione del intero sistema in un archi di tempo di 274, 472, 525 secondi. Il grafico riportato nella figura 3.6 descrive l'andamento delle temperature per i punti di campionamento nel caso di un rapporto di concentrazione CR=1500. Le curve per gli altri due casi hanno mostrato una evoluzione temporale equivalente.

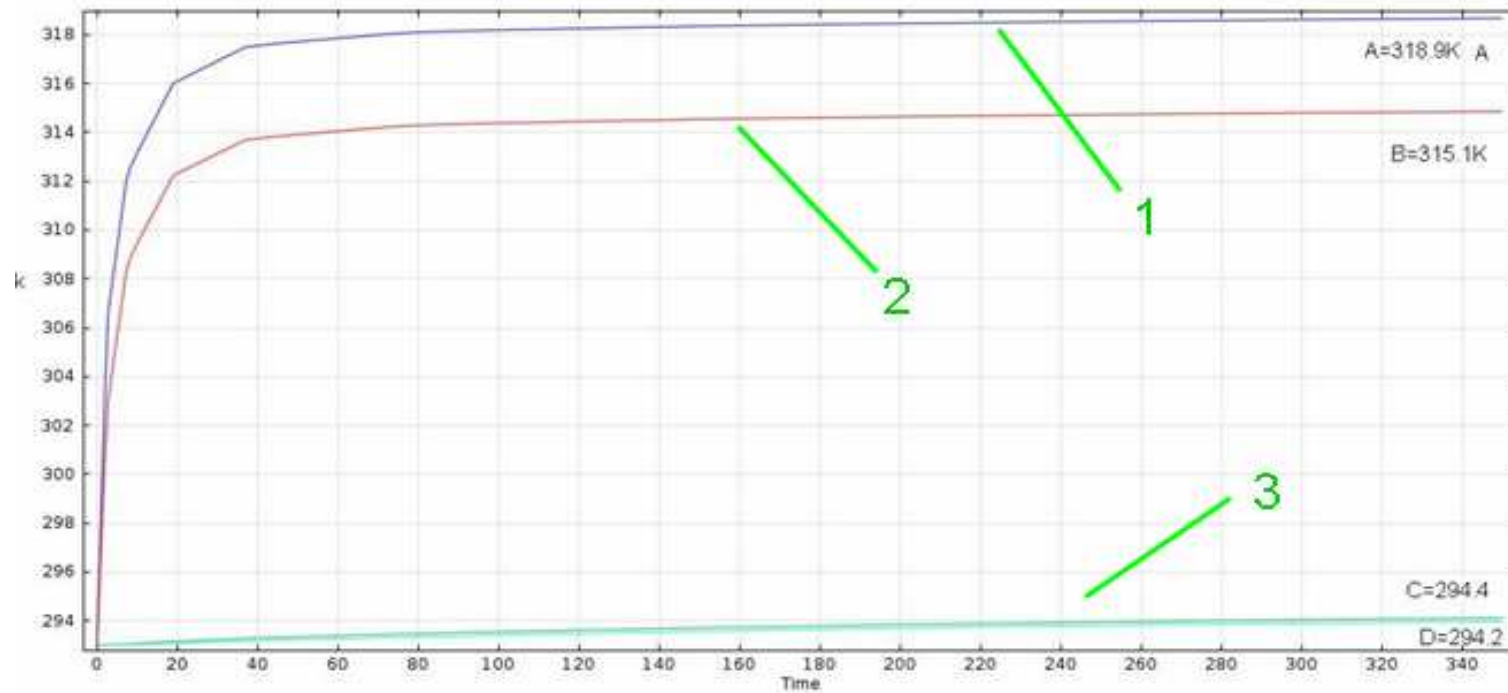


Figura 3.6 Analisi delle temperature nei punti di campionamento della fibra per un rapporto di concentrazione $CR=1500$. Il sistema, in questo caso necessita di circa 340 secondi per raggiungere la stabilità. Le curve 1,2 e 3 rappresentano l'andamento delle temperature dell'ingresso della fibra, del rivestimento superficiale e della meccanica di supporto. Da notare come l'andamento dei punti C e D sia quasi completamente sovrapposto

Simulazioni numeriche per il regime laminare con rapporto di concentrazione CR=95

Queste simulazioni sono state calcolare assumendo una temperatura iniziale dell'aria di 297.4K, corrispondente a quella del laboratorio e valutando una potenza d'ingresso sulla fibra pari a $115 \cdot 10^{-3} \text{ W/mm}^2$. I valori dei punti di controllo sono stati riportati nella tabella 4.8.

CR	A	B	C	D
95	299.1k	299.1k	297.4k	297.4k

Tabella 3.8 Temperature dei punti di controllo CR=95

3.8.2 Simulazioni numeriche per il regime turbolento

Le temperature dei punti A, B, C e D ed i loro spostamenti relativi sono stati riportati nella tabella 9.

CR	A T/DP	B T/DP	C T/DP	D T/DP
750	300.6k/0.16	299.5/0.16	293.7k/0.02	293.2k/0.09
1500	306.9k/0.31	303.5/0.30	293.9/0.02	293.2k/0.09
3000	330.5k/0.38	312.3/0.4	295k/0.02	294.8k/0.11

Tabella 3.9 Temperature dei punti di controllo e spostamenti relativi per il modello turbolento

Le figure 3.7 e 3.8 mostrano invece la risposta termica del sistema e l'andamento del fluido vicino alle pareti.

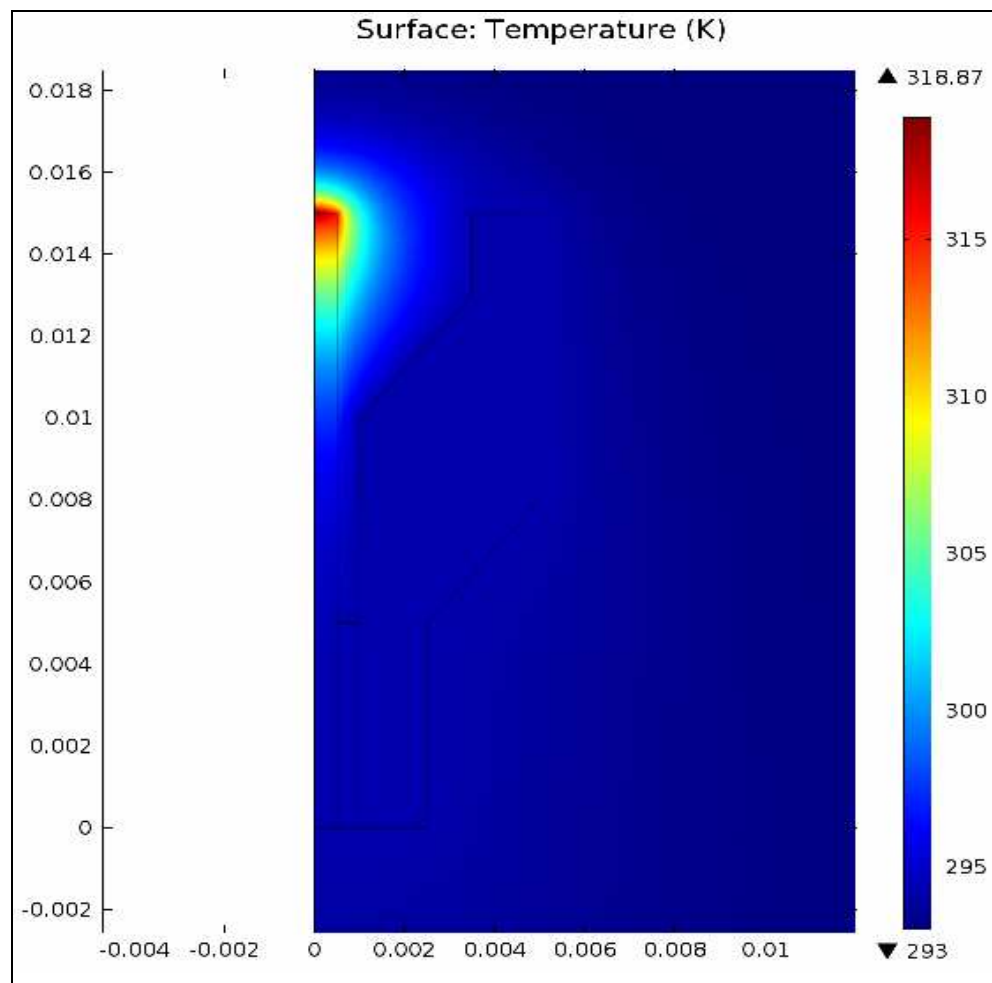


Figura 3.7 Distribuzione delle temperature in tutto l'insieme

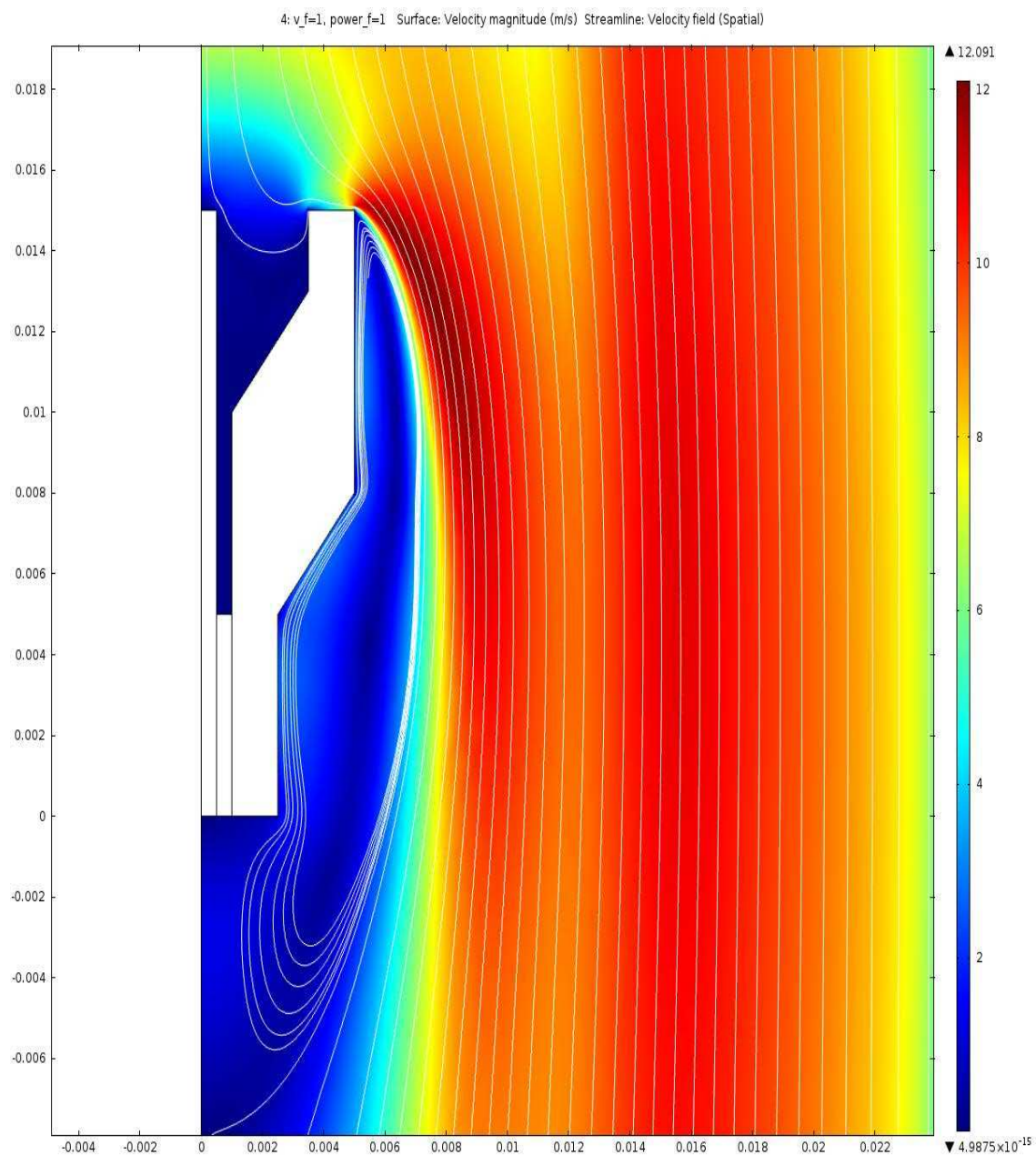


Figura 3.8 Distribuzione dei flussi dell' aria intorno alla fibra

3.8.3 Dati sperimentali

Le temperature campionate per i punti di controllo sono state riassunte nella tabella 3.10.

CR	A	B	C	D
95	299.2k	299.2k	297.4k	297.4k

Tabella 3.10 Dati sperimentali campionati per i punti di controllo

La figura 3.9 mostra la parte finale dell'arrangiamento utilizzata per misurare la temperatura del sistema in laboratorio.

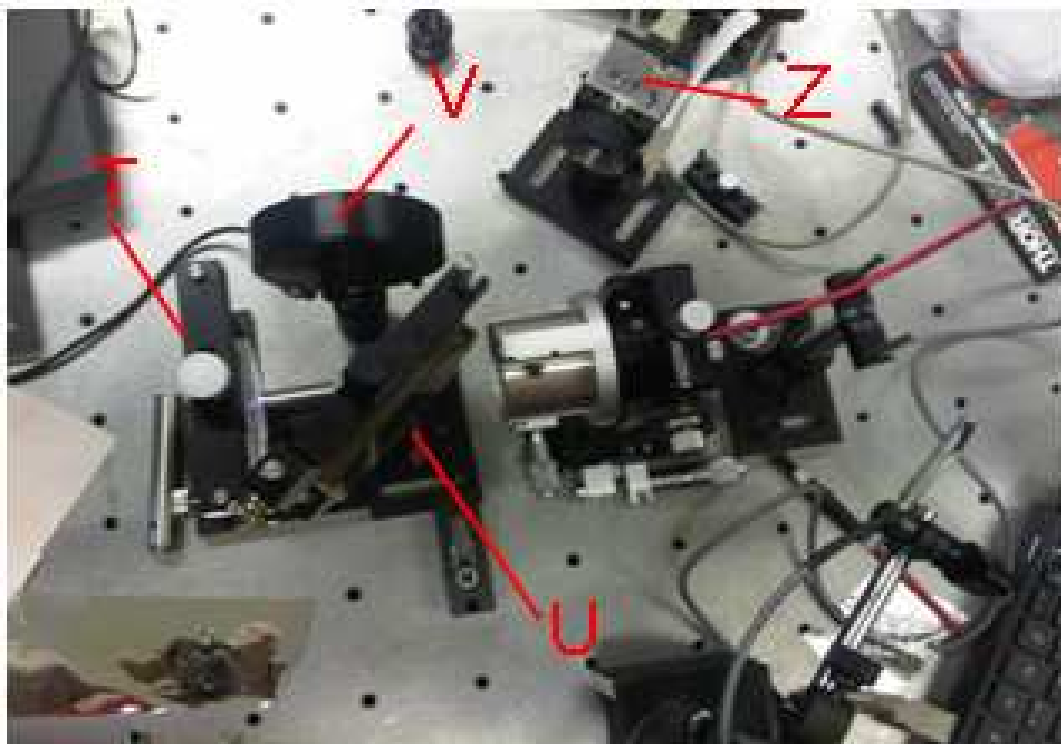


Figura 3.9 Arrangiamento di misura utilizzato per le misure termiche sulla testa della fibra

I raggi focalizzati dal doppietto T sono stati deviati dallo specchio U e proiettati sul sensore del power meter V (Laser Star Product by Ophir). La dimensione dello spot è stata controllata utilizzando lo stesso sistema ma sostituendo un sensore CCD (UI-1120SE-M della IDS) al power meter.

3.9 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La sintesi dei risultati ottenuti dalle simulazioni e i dati ricavati in laboratorio mostrano come solo il core della fibra sia affetto da un rilevante aumento di

temperatura. Il campionamento degli altri punti di controllo, rappresentativi del sistema, sia in condizioni laminari che turbolente, ha evidenziato come i valori siano rimasti invariati o comunque molto simili alle condizioni di partenza (tabelle 3.7 e 3.9). Questo dato è stato confermato anche dall'analisi delle curve riportate in figura 3.6. Gli andamenti che descrivono la risposta temporale rispetto alle sollecitazioni termiche mostrano una sovrapposizione nel comportamento dei punti C e D con valori che si sono discostati di poco rispetto dalla temperatura ambiente. Il calcolo degli spostamenti indotti, quantificabili in pochi centesimi e solo per i rapporti di concentrazione più elevati ha quindi suggerito come la schematizzazione proposta sia in linea con le tolleranze di allineamento necessarie a questo genere di sistemi. Lo stesso è stato confermato dall'analisi dei flussi dell'aria all'interno della meccanica, durante le simulazioni dei moti turbolenti: le zone di ristagno presenti all'interno della fibra non ne provocano movimenti apprezzabili.

Lo schema proposto dunque non incide sulla quota di errore di allineamento e rappresenta quindi una base di partenza per la progettazione di sistemi che utilizzano questo tipo di tecnologia.

4 - MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA

4.1 INTRODUZIONE

Nei due capitoli precedenti sono stati descritti il modello numerico e gli apparati sperimentali utilizzati per la caratterizzazione della fibra ottica che verrà integrata nel sistema proposto. Le peculiarità messe in luce dalla sintesi delle prove effettuate per questo elemento hanno permesso di integrare la base di partenza necessaria per la progettazione del sistema.

In questo capitolo saranno descritte la modellizzazione relativa alle ottiche di raccolta e le simulazioni effettuate. I raytracing, sono stati calcolati attraverso due software di progettazione ottica: Zemax (Radiant Zemax) per la parte sequenziale e LightTools (Optical research Associated) per la parte non sequenziale.

4.2 SPECIFICHE DELLA SORGENTE

La radiazione emessa dal sole può essere considerata come la somma di due componenti principali: una diretta ed una diffusa [45]. La prima, emessa dalla regione circumsolare, ha un'apertura approssimativa di ± 0.25 gradi a cui va aggiunta la luce scatterata nell'atmosfera e che può essere considerata compresa in un cono di ± 5 gradi. La luce al di fuori di questo secondo cono angolare viene considerata luce diffusa. Esistono diversi modelli utilizzati per la descrizione della distribuzione delle componenti dirette e diffuse, il più semplice dei quali è quello che considera solo il termine del primo cono ed impone al suo interno una distribuzione omogenea dell'energia. Altri modelli si basano invece sul rapporto circumsolare CSR, che sfrutta un' equazione funzione delle distribuzione delle intensità tra la regione circumsolare e quella solare [46]. Il CSR dipende dalle condizioni dell' atmosfera come il vapor d'acqua, la polvere e le molecole d'aria. Questa dipendenza è definita tramite l'introduzione del concetto di *Air mass*, AM, che permette di relazionare lo spettro a terra in funzione della quantità di atmosfera attraversata (fig. 4.1).

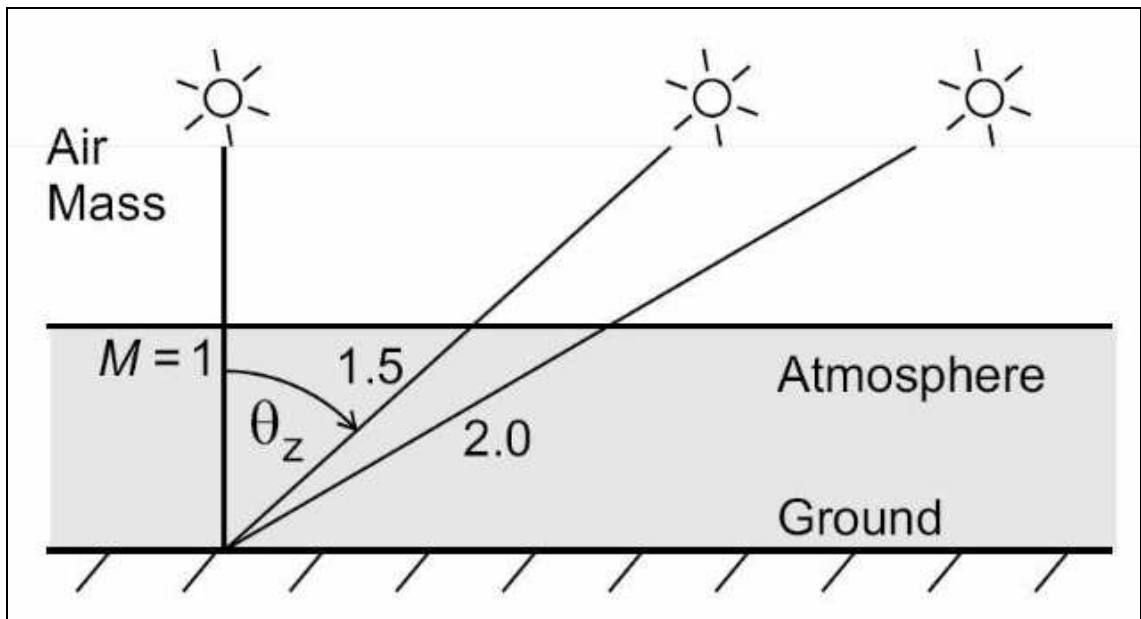


Figura 4.1 Air mass

Il fattore AM identifica la secante dell' angolo zenitale $X = \sec(z)$. Alle nostre latitudini questo fattore ha un valore di circa 1.5 (fig. 4.2).

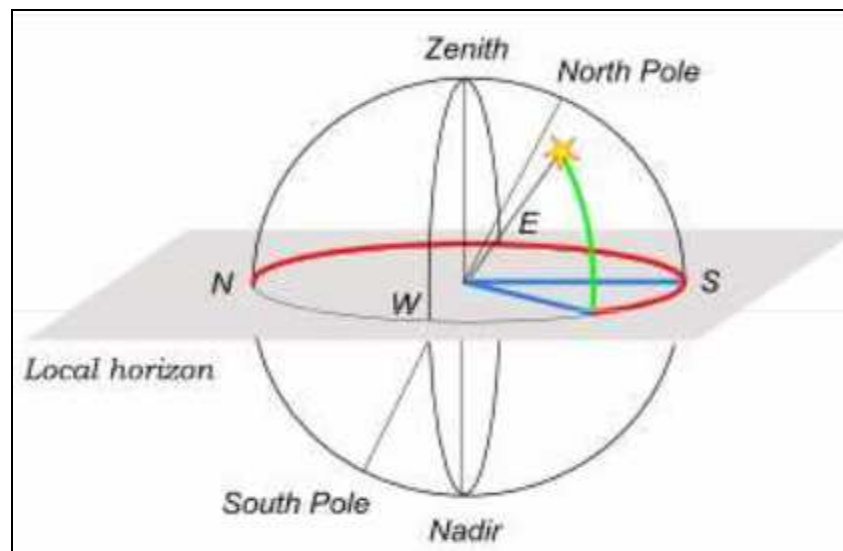


Figura 4.2 AM

La seconda componente, quella relativa al termine diffusivo può esser schematizzata, a sua volta, in diversi modi. Il più semplice assume una volta

caratterizzata da un'irradianza diffusa ed uno spettro uniformemente distribuito sull'intero emisfero, mentre i modelli più complessi prendono in considerazione anche altri fattori come l'assorbimento dovuto al vapore d'acqua, i gas permanenti ed effetti locali imputabili a diverse cause come ad esempio la vegetazione presente o il tipo di terreno [47].

L'aggiunta della componente diffusiva per la sorgente, tuttavia, deve essere considerata solo nella progettazione di impianti che utilizzano pannelli fotovoltaici planari, o per concentratori aventi ottiche di raccolta con un campo di vista esteso.

Il sistema proposto, è caratterizzato da un elevato rapporto di concentrazione e un campo di vista stretto che permette di ricondurre la rappresentazione della sorgente alla sola componente diretta, schematizzabile, attraverso un'apertura di ± 0.25 gradi e una distribuzione uniforme dell'energia all'interno dell'angolo sotteso.

Lo spettro di emissione della sorgente è quello tipicamente definito attraverso il modello ASTM 1.5G173 [48] ossia una emissione assimilabile a quella di corpo nero di temperatura pari a 5800K con un estensione compresa tra i 290 e i 4000nm (fig. 4.3).

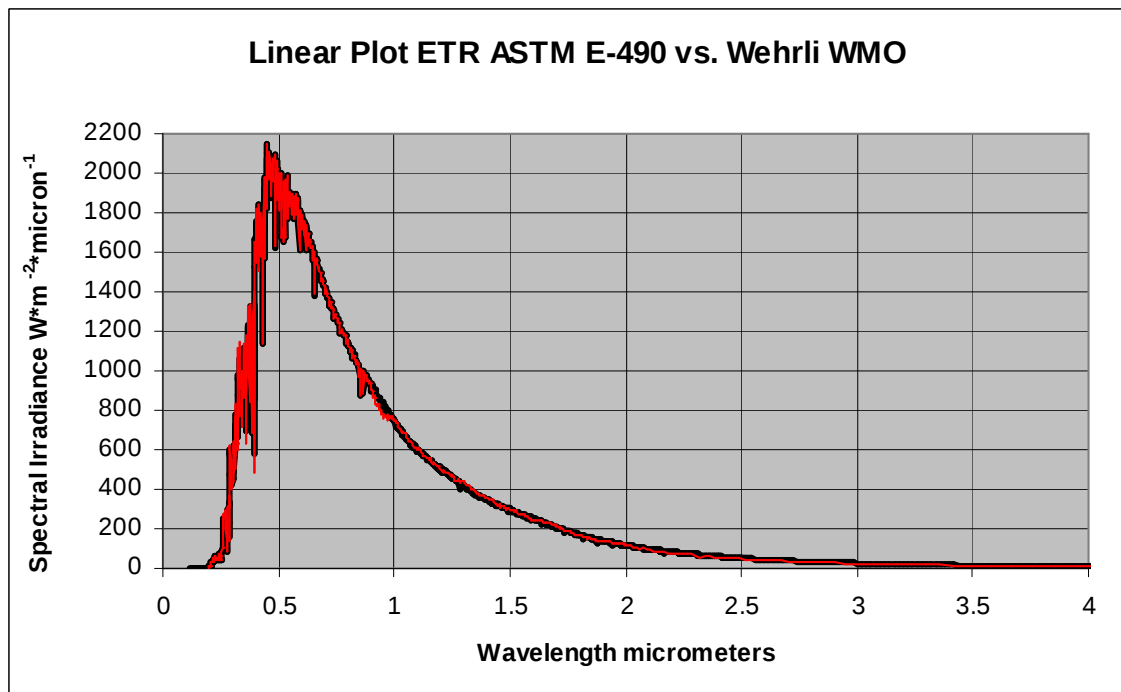


Figura 4.3 Spettro di emissione del Sole

Le banda di emissione considerata tuttavia, per le applicazioni solari, viene ulteriormente ridotta troncando il modello a 2500nm (fig. 4.4).

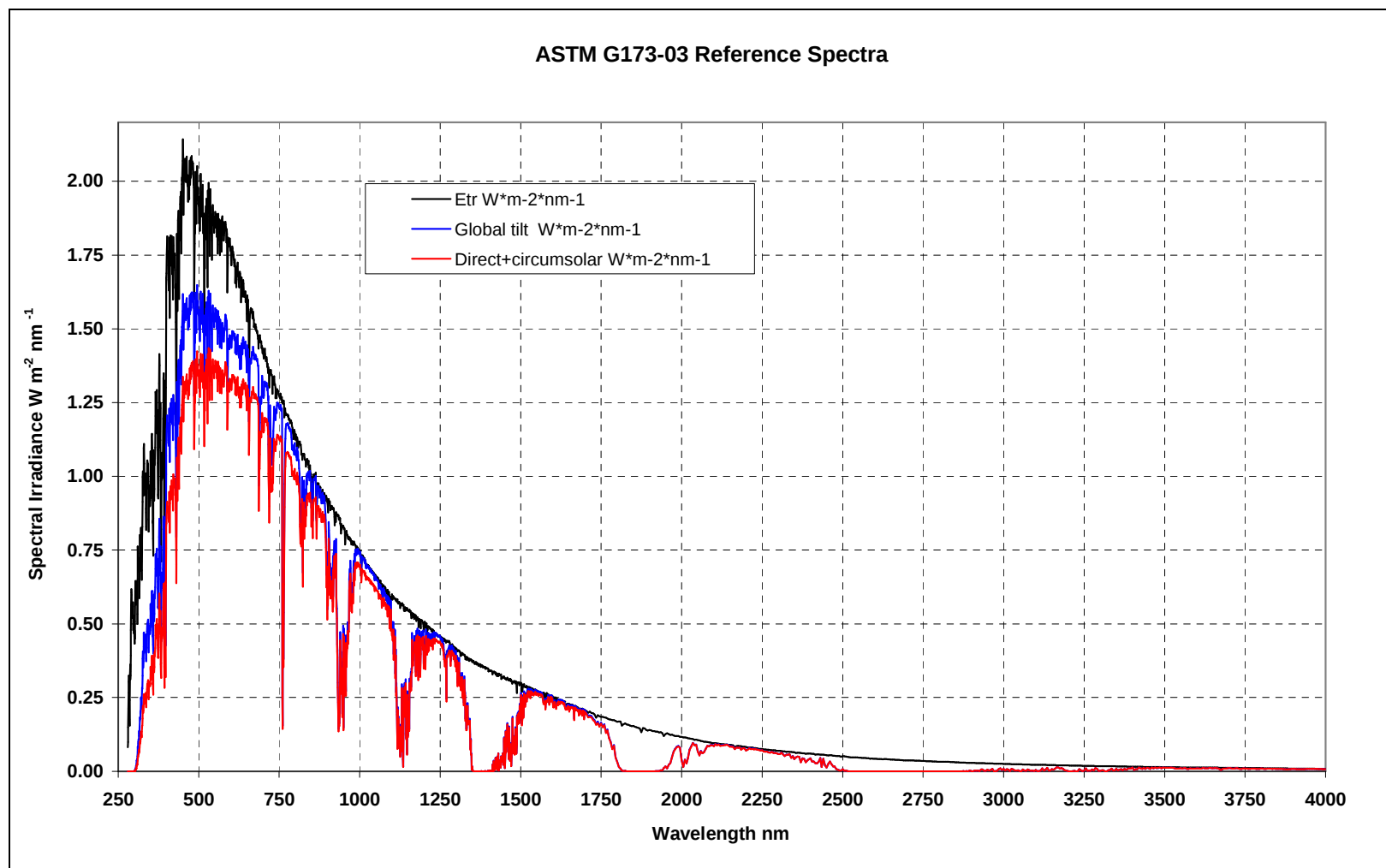


Figura 4.4 Spettro di emissione del Sole a terra

Questa approssimazione modifica la quota di energia considerata dovuta all'irraggiamento, trascurando un valore stimabile valutato intorno all' 1.5 %. Le celle fotovoltaiche con elevate efficienze, inoltre, hanno una capacità di conversione della radiazione che si estende fino ai 1800nm (fig. 4.5) [49] e, quindi, il modello adottato per la sorgente risulta essere idoneo per studiare in maniera esaustiva il sistema.

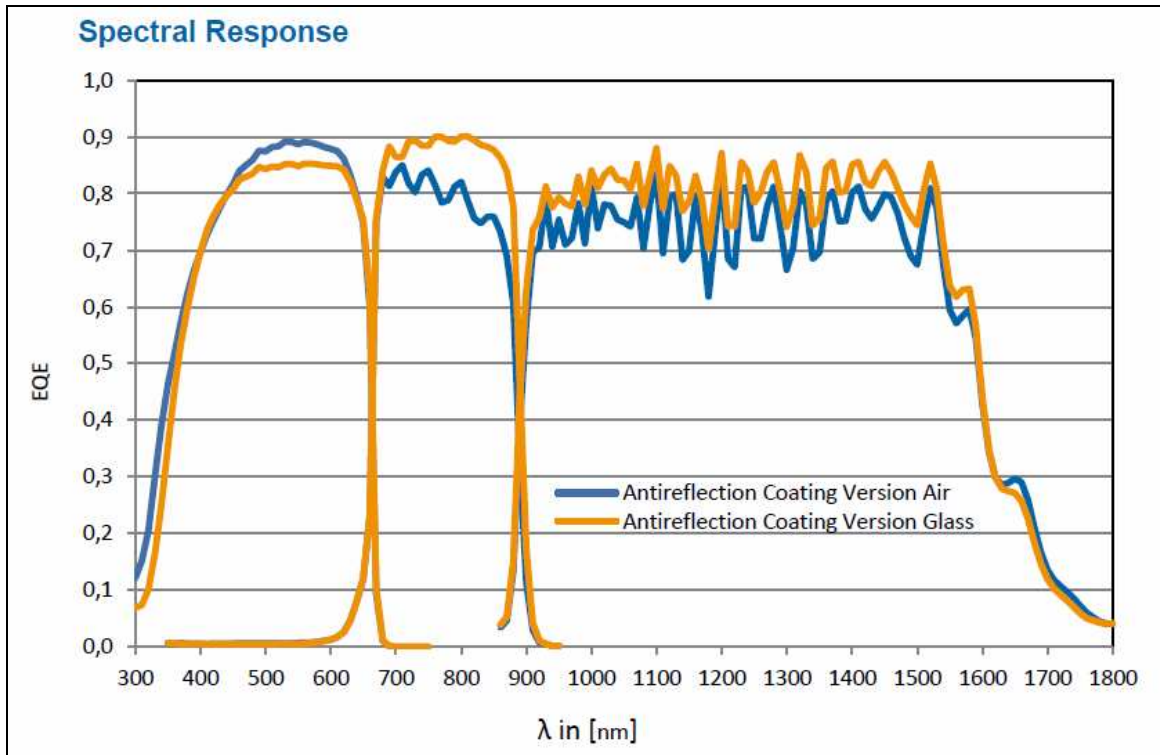


Figura 4.5 Risposta spettrale di una cella solare

4.3 CARATTERISTICHE DELLA CELLA FOTOVOLTAICA

In questo paragrafo sono state riportate le peculiarità della cella fotovoltaica adottata. Il modello individuato, ha forma quadrata (5 mmx5 mm) con un'area utile di forma circolare avente un diametro di 3.2mm . Il suo spettro di risposta è stato riportato nella figura 4.5, mentre i grafici delle figure 4.6 e 4.7, descrivono, rispettivamente, l'efficienza in relazione alla concentrazione e il rendimento in funzione della temperatura di esercizio. Le curve riportate nella figura 4.6 sono riferite alle seguenti condizioni:

- intensità della luce: $1000 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ sole}$

- spettro solare: AM1. (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 I)
- temperatura: 25°C

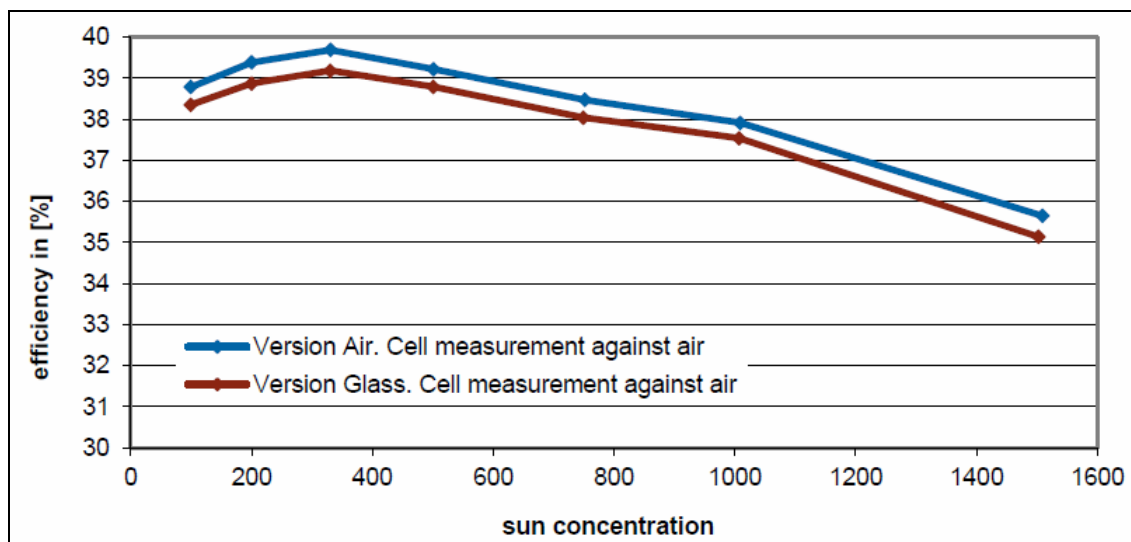


Figura 4.6 Efficienza della cella in funzione del numero di soli

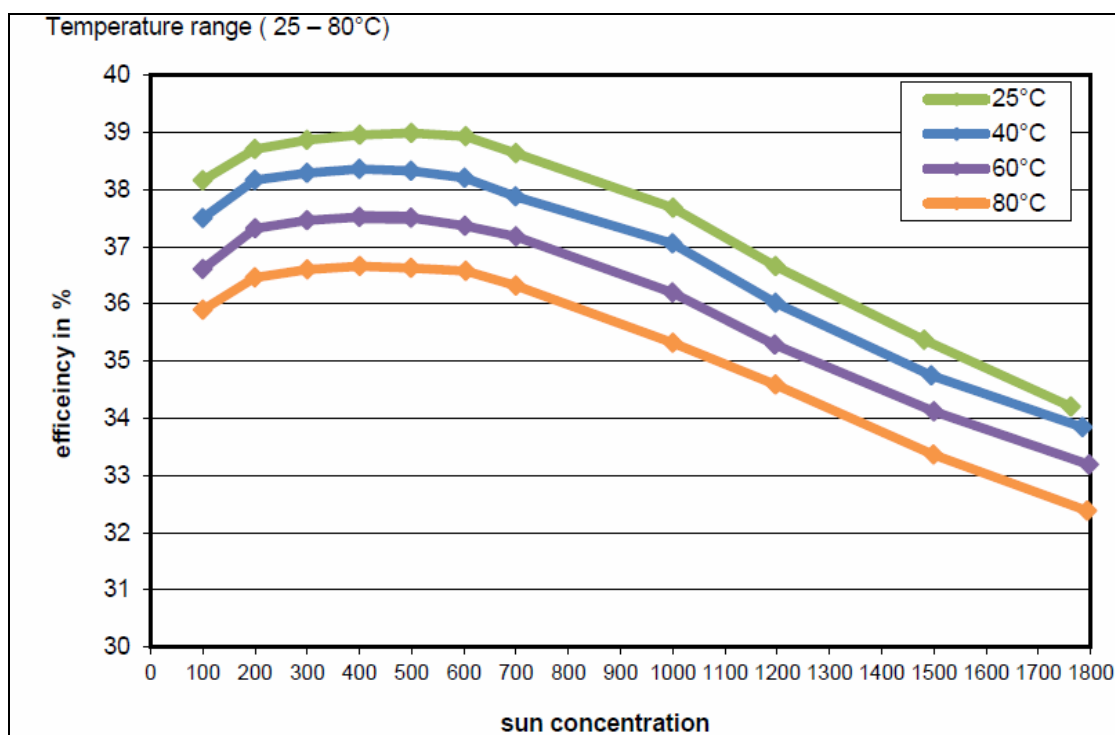


Figura 4.7 Efficienza della cella in funzione del numero di soli e della temperatura di esercizio

4.4 MODELLIZZAZIONE DEL SISTEMA

La figura 4.8 schematizza il funzionamento del dispositivo che è stato progettato.

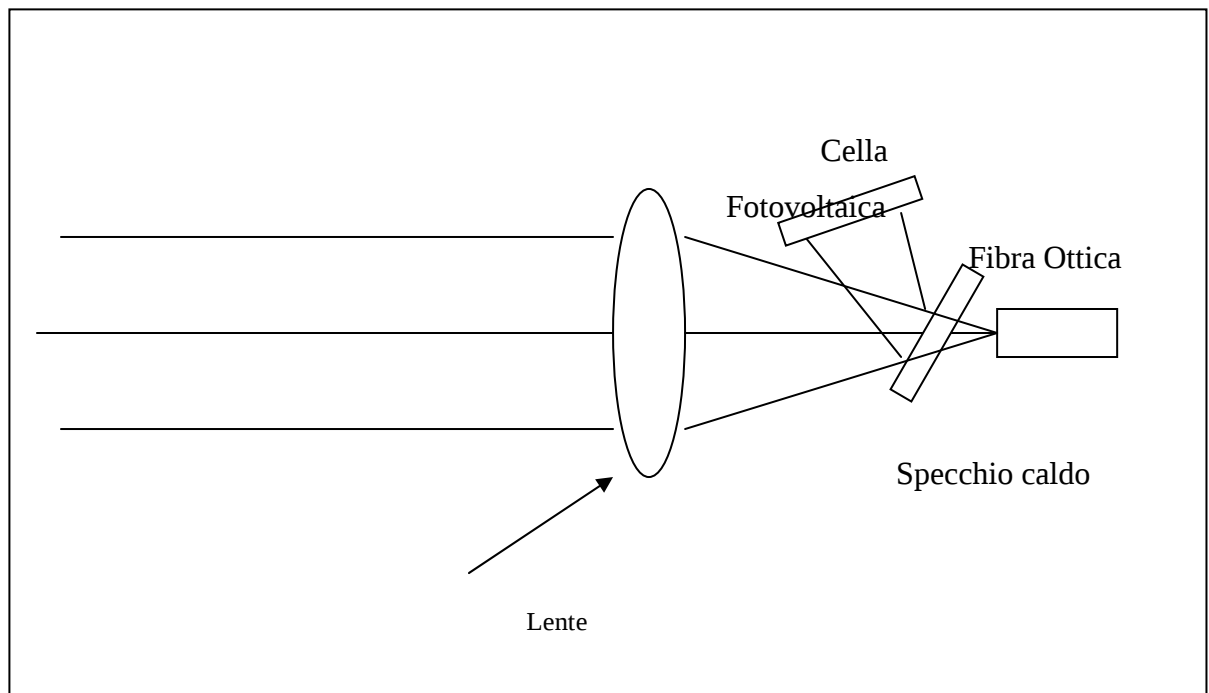


Figura 4.8 Schema di funzionamento del sistema

La radiazione emessa dal sole viene raccolta e concentrata tramite una sistema ottico, quindi divisa prima del fuoco in due percorsi distinti utilizzando uno specchio caldo. La parte della radiazione visibile viene focalizzata e incanalata nella fibra, mentre quella rimanente viene deflessa ed inviata verso una cella fotovoltaica per essere trasformata in energia elettrica.

Lo studio e l'ottimizzazione del sistema sono stati divisi in due parti. La prima, calcolata in modalità sequenziale, è stata indirizzata verso l'ottimizzazione dell'accoppiamento delle ottiche di raccolta con la fibra partendo dai risultati sperimentali acquisiti (capitoli 2 e 3) e dalle specifiche della sorgente descritte nei paragrafi precedenti. La seconda, inerente alla modellizzazione complessiva del sistema che include la cella, è stata calcolata in modalità non sequenziale sfruttando anche l'interazione del software di raytracing e di un CAD tridimensionale. Gli algoritmi

necessari per tutte le ottimizzazioni e le interazioni tra i vari programmi sono stati scritti in linguaggio Matlab.

Il modello di partenza è costituito da un doppietto acromatico con una apertura utile di 50mm [50], uno specchio caldo ricavato con una deposizione sulle due facce di su un supporto di quarzo ed una fibra con un core di 1mm (fig. 4.9).

4.4.1 Raytracing sequenziale

Il sistema reale prendendo in esame solo le lunghezze d'onda visibili, valutate tra $0.48\ \mu\text{m}$ e $0.65\ \mu\text{m}$, reimmagina sul piano coniugato la sorgente iscrivendola in una circonferenza di diametro 1.26 mm (fig 4.10) con un rapporto di concentrazione equivalente a 1574 disperdendo circa il 30% la della luce raccolta.

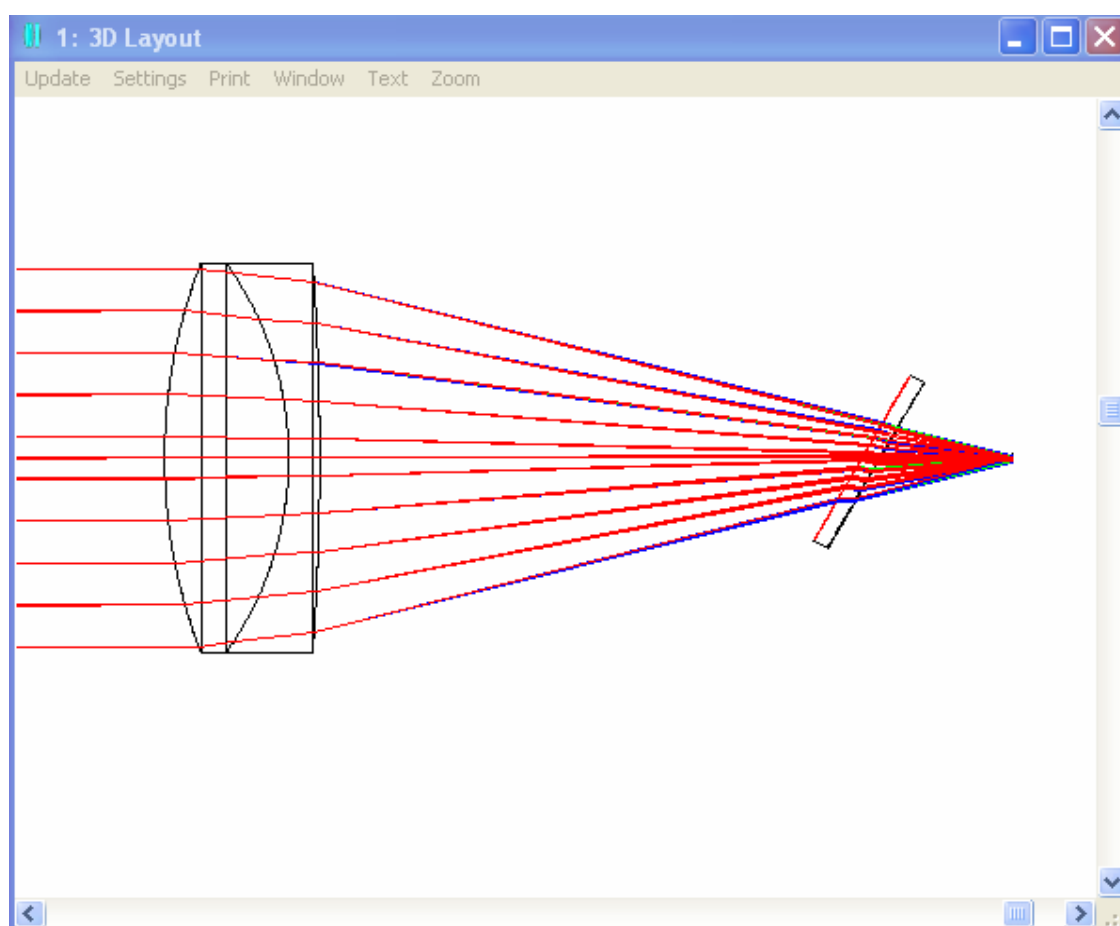


Figura 4.9 Simulazione delle condizioni di partenza

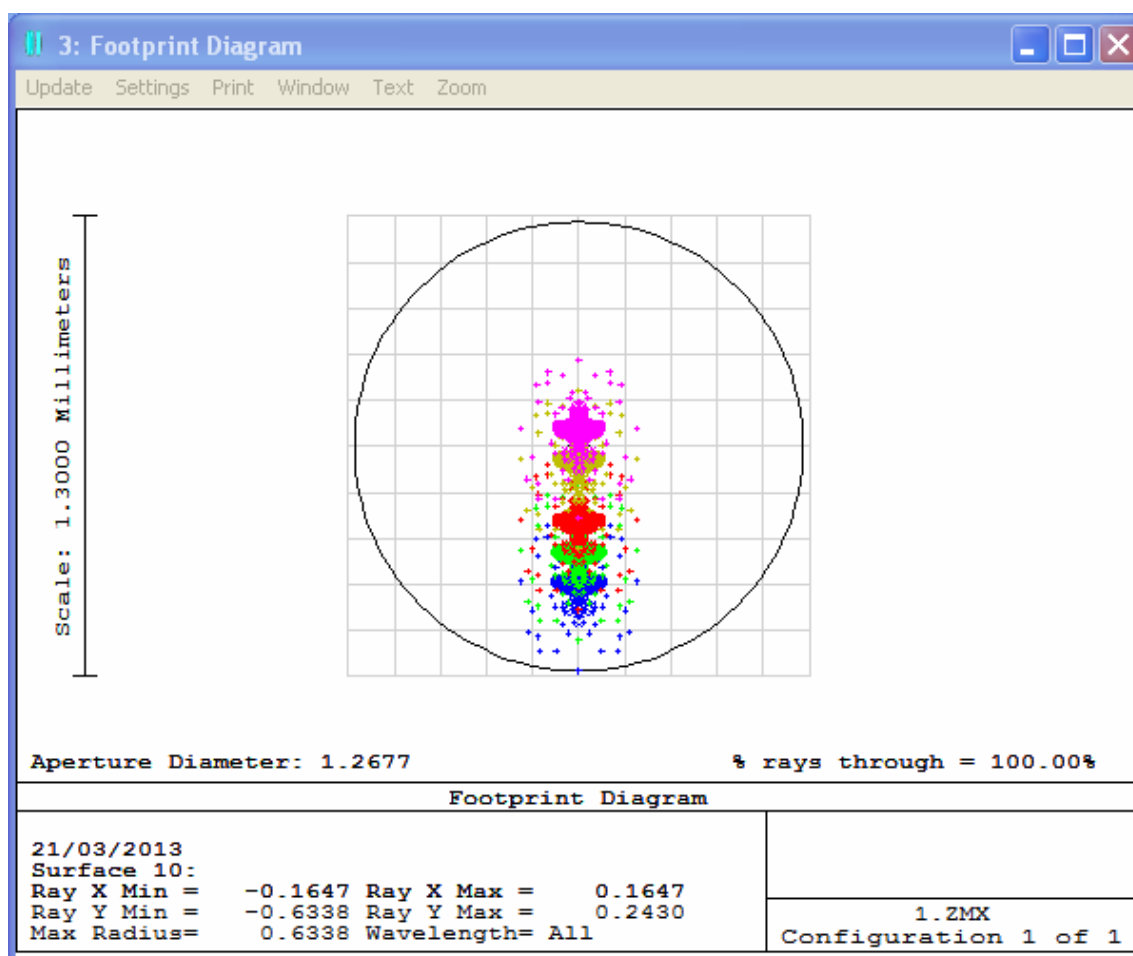


Figura 4.10 Piano immagine relativo alle lunghezze d'onda comprese tra $0.48 \mu\text{m}$ e $0.65 \mu\text{m}$

Assumendo come variabili i raggi di curvatura delle superfici degli elementi del doppietto e riducendo lo spessore della lamina dielettrica, il sistema ottico è stato modificato fino a ottenere un'immagine contenuta in un diametro di circa 0.9 mm . Questo processo è stato effettuato attraverso l'interazione di un algoritmo di ottimizzazione del software di progettazione ottica [51], collegato ad una opportuna funzione di merito scritta in Matlab. Lo script ha analizzato la posizione dei raggi passanti per le circonferenze della pupilla del sistema provenienti dal piano oggetto per ogni lunghezza d'onda e valutando la posizione della loro proiezione sul piano immagine, e ha calcolato la differenza rispetto a quelle cercate relazionando la discrepanza ad una funzione d'errore. L'interazione tra la funzione di merito e l'algoritmo di ottimizzazione ha modificato iterativamente il valore delle variabili fino alla minimizzazione della funzione di errore.

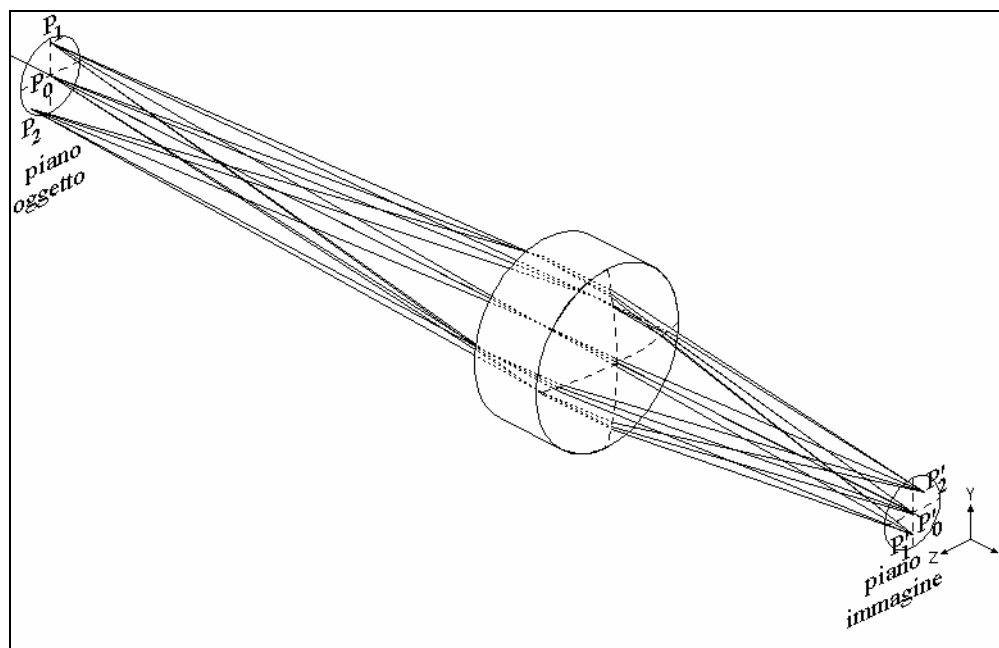


Figura 4.11 Punti oggetto e punti immagine del sistema ottico

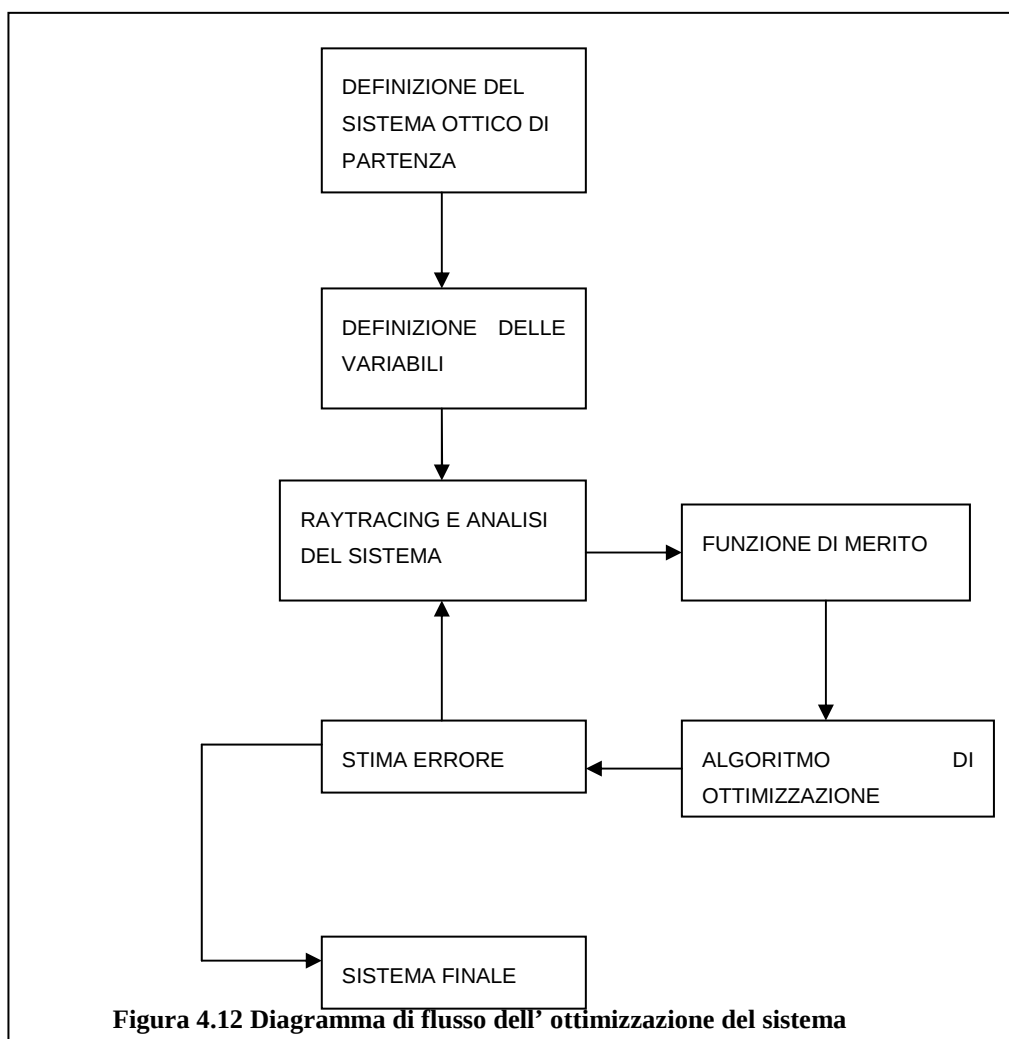


Figura 4.12 Diagramma di flusso dell'ottimizzazione del sistema

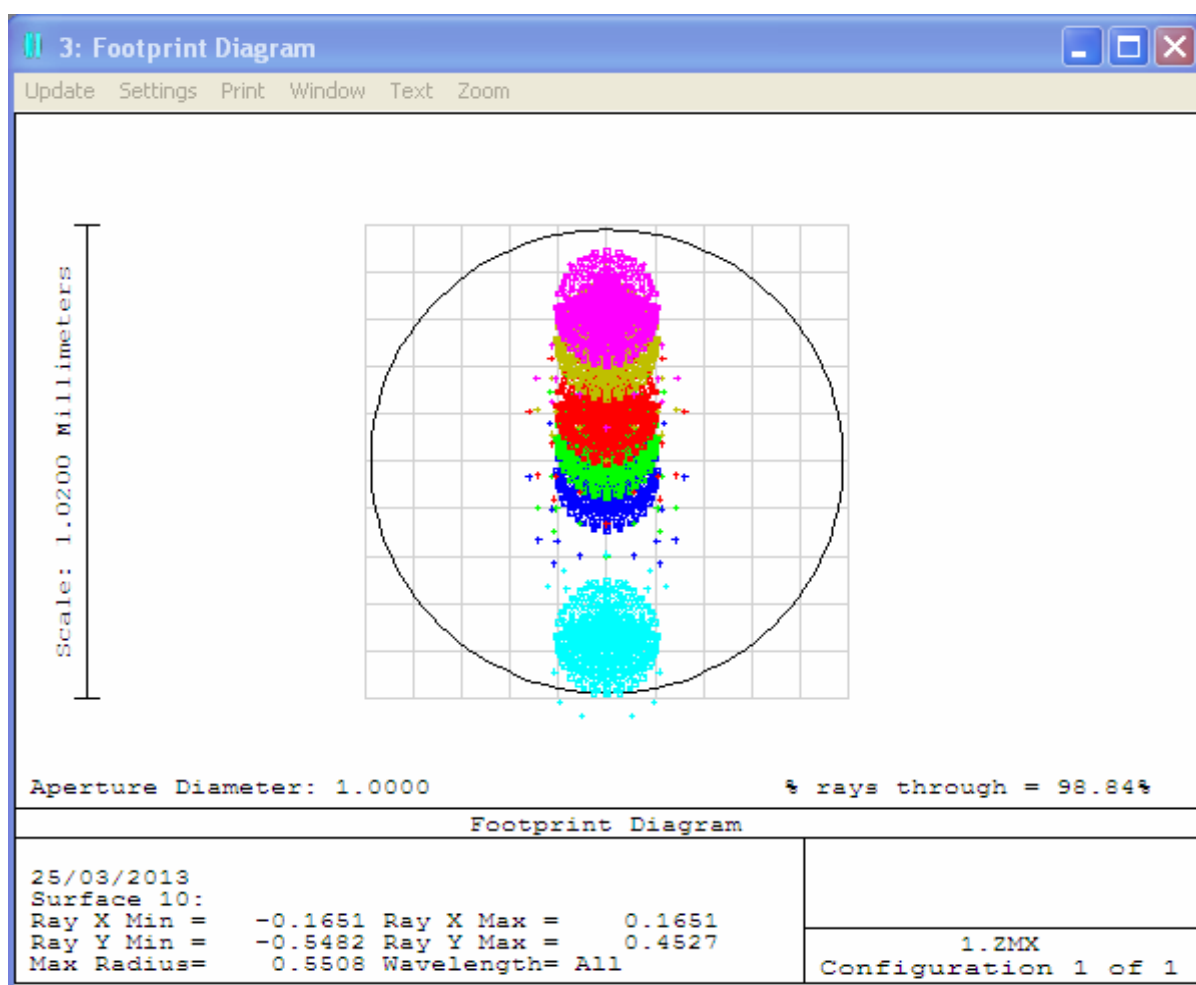


Figura 4.13 Piano immagine, range spettrale 0.48-0.65micron, per il sistema ottimizzato.

Nella tabella 4.1 sono stati riportati i dati del sistema di partenza e di quello ottimizzato.

Raggi lenti	Sistema di partenza	Sistema ottimizzato	Distanze	Sistema di partenza	Sistema ottimizzato	Vetri
R1	71.12	55.394	D1	16	16	N-BAF10
R2	-44.17	-42.444	D2	4	5	SF10
R3	-363.1	-526.535	D3	70	60	
Tabella 4.1 Caratteristiche del sistema di partenza e di quello ottimizzato.				D4	1.5	FUSED SILICA
			D5	17.654	9.141	

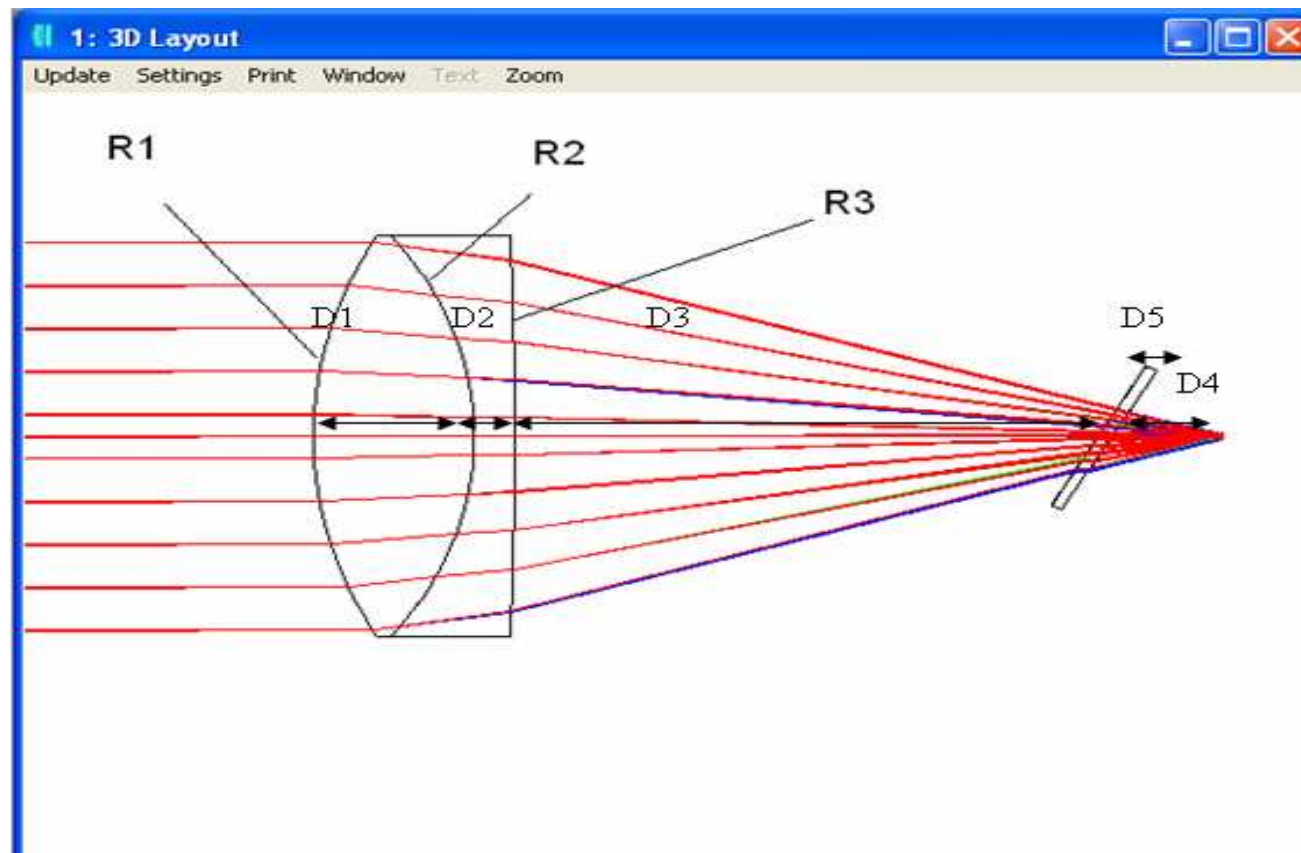


Figura 4.14 Sistema ottimizzato

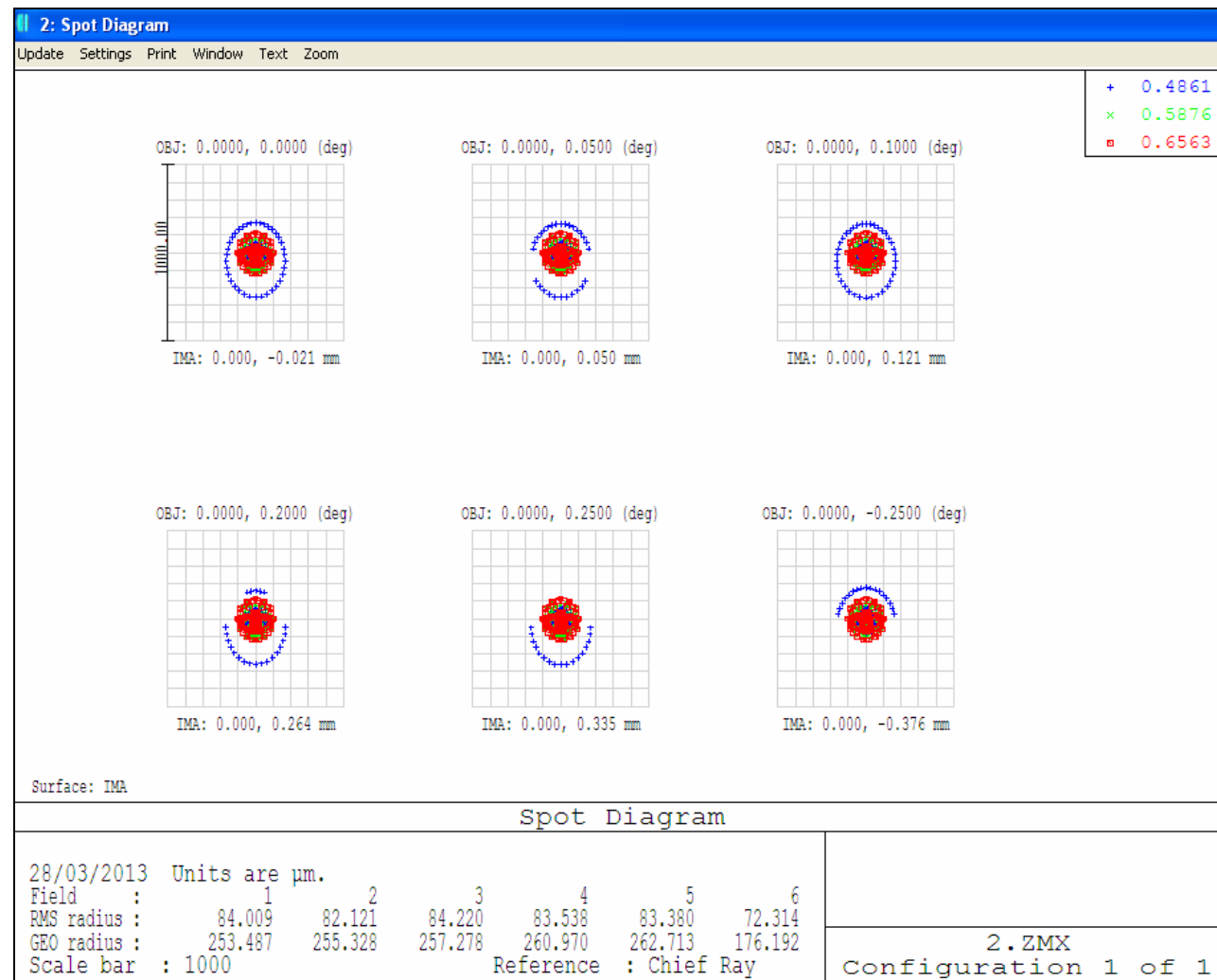


Figura 4.15 diagramma di spot policromatico (range spettrale 0.48-0.65micron).

Analisi delle tolleranze

In questo paragrafo è stata descritta la risposta del sistema ad eventuali errori costruttivi e di disallineamento.

a) Irregolarità superficiali

Sono state simulati gli effetti di eventuali irregolarità superficiali per valutare la risposta del sistema ad eventuali errori costruttivi:

- frange di sfericità (valutate a 632.8nm) = 40 = 0.0126 mm sul primo componente;
- frange di astigmatismo (valutate a 632.8nm) = 30 = 0.0095 mm su entrambi i diottri.

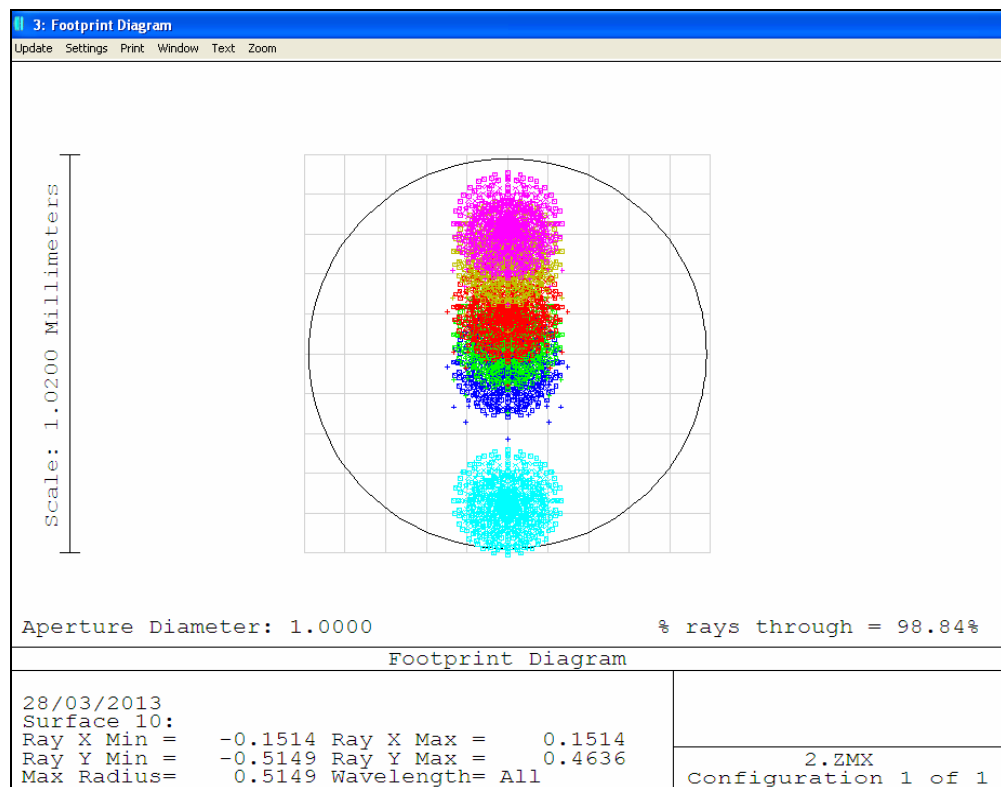


Figura 4.16 Piano immagine, range spettrale 0.48-0.65micron, per il sistema ottimizzato aberrato da irregolarità superficiali

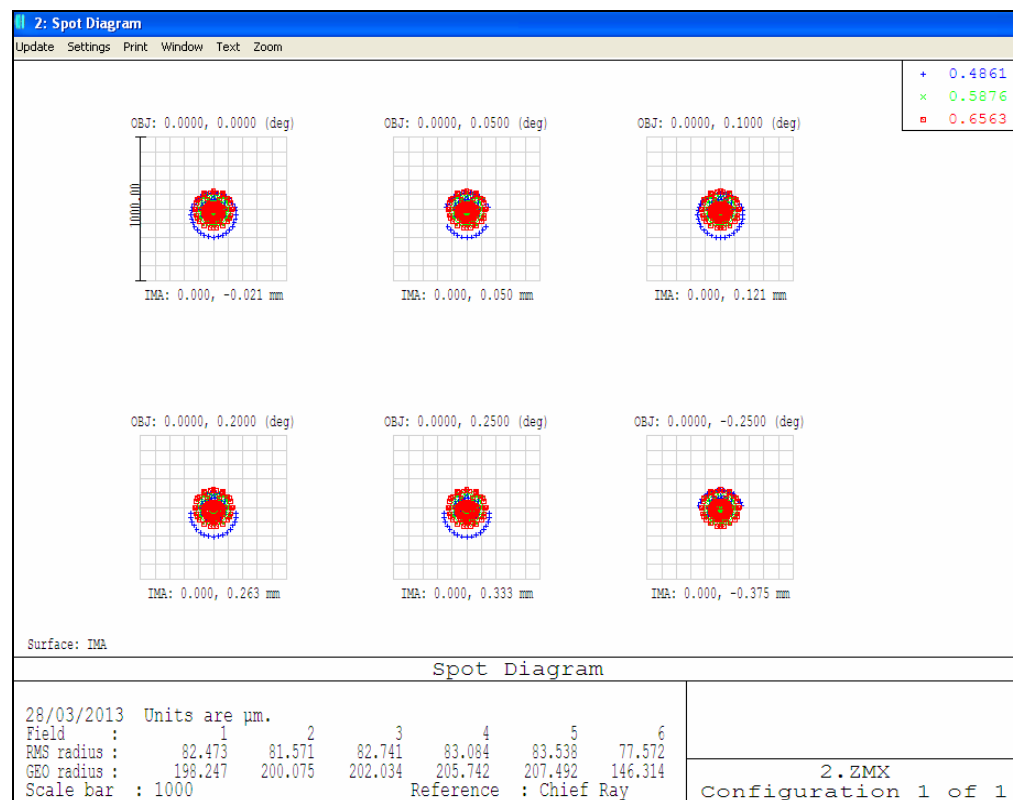


Figura 4.17 diagramma di spot policromatico (range spettrale 0.48-0.65micron) del sistema aberrato.

a. Errori sullo spessore delle ottiche

Sono state valutate le risposte del sistema, considerando l'aumento dello spessore al centro per tutte le ottiche di ± 0.20 mm: il sistema non risente in maniera apprezzabile degli errori introdotti.

b. Effetto di errori di tilt

Sono state esaminati gli effetti di tilt negli allineamenti tra la sorgente e l'ottica di raccolta e quelli relativi tra il specchio diecrico e il doppietto. Il FOV (field of view) è stato aumentato di $\pm 0.15^\circ$ mentre la lamina è stata tiltata rispetto alla sua posizione originaria con valori uguali a $\pm 1^\circ$.

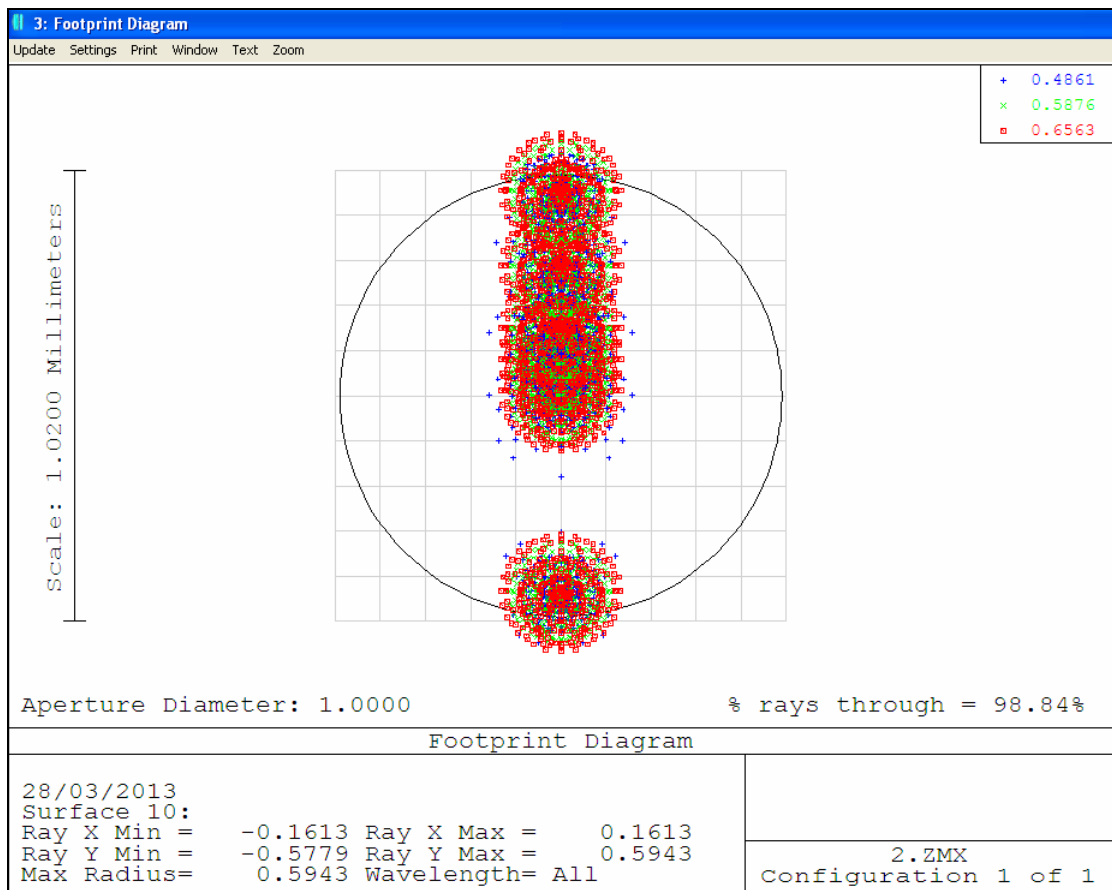


Figura 4.18 Piano immagine, range spettrale 0.48-0.65micron, per il sistema con un tilt complessivo di 9°

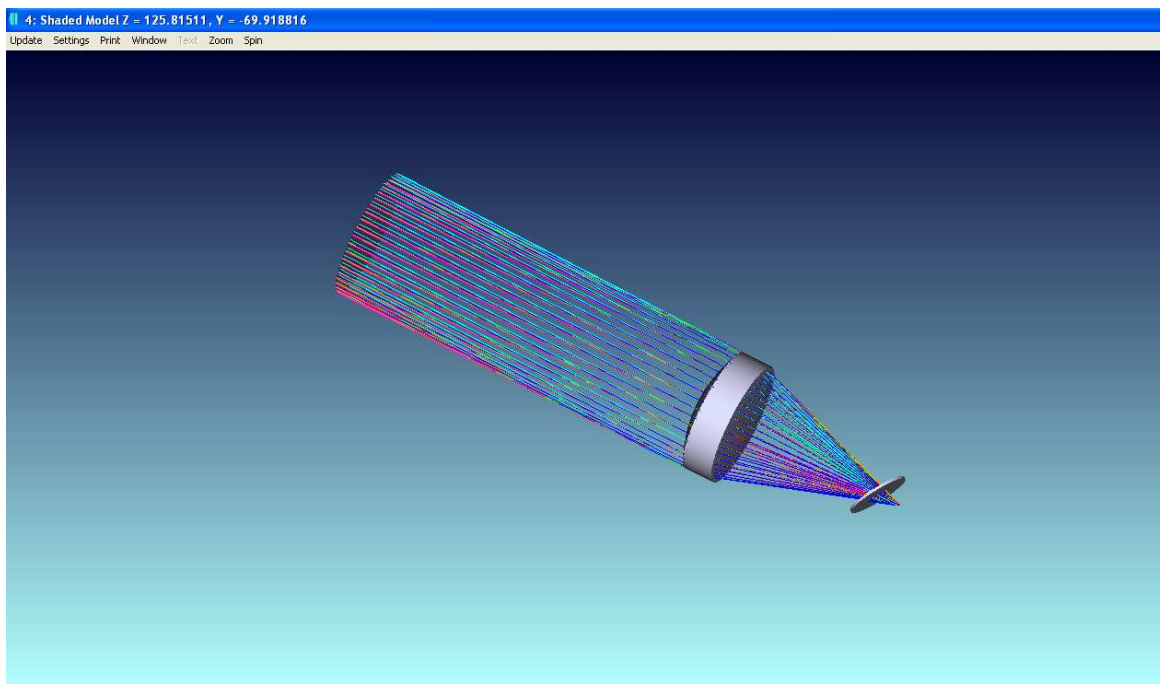


Figura 4.19 Tilt tra la sorgente e il concentratore solare

La risposta del sistema a disallineamenti rispetto alla sorgente di $\pm 0.15^\circ$ è quantificabile in una perdita di efficienza di 0.18.

Nella tabella 4.2 sono stati riportati i valori massimi sopportabili dal sistema per mantenere un rendimento η maggiore di 0,8.

<i>Parametro</i>	<i>Valore massimo sopportabile ($\eta=0.8$)</i>
Irregolarità superficiali	3/40(30) espresse secondo DIN3140
Errori sullo spessore delle ottiche	$\pm 0.5\text{mm}$
<i>Tilt</i> della guida di luce rispetto all'asse ottico	$\pm 1^\circ$ (cap 2)
<i>Decentering</i> della sup. di ingresso della guida di luce rispetto all'asse ottico	± 0.2 (cap 2)
Distanza relativa tra doppietto e lamina dicroica	$\pm 0.1\text{mm}$
Distanza relativa tra doppietto e sup. di ingresso della	$\pm 0.2\text{mm}$ (cap 2)

guida di luce	
---------------	--

Tabella 4.2 Sintesi analisi delle tolleranze.

4.4.2 Raytracing non sequenziale

Le condizioni non sequenziali sono state simulate utilizzando la configurazione ottica determinata in modalità sequenziale e introducendo nel sistema la cella fotovoltaica, che è schematizzata tramite un disco rappresentativo della sua sola superficie utile. La banda di emissione per la sorgente è stata estesa fino a 1800 nm con la distribuzione spettrale illustrata nel paragrafo 4.2. E' stata assunta una potenza in ingresso sulla prima superficie della lente equivalente a 1.000 W/m^2 , e sono state prese in considerazione le dispersioni dei vetri e quelle dovute ai trattamenti presenti sulle superfici di tutti gli elementi ottici. Una approssimazione conservativa, ha permesso di assumere la trasmissione media per tutti i vetri del sistema di 0.95 e un' efficienza dello specchio diecrico pari allo 0.85 sia in trasmissione che in riflessione. Le simulazioni hanno permesso di definire la posizione ottimale della cella e valutare la ripartizione della potenza tra i dispositivi di assorbimento.

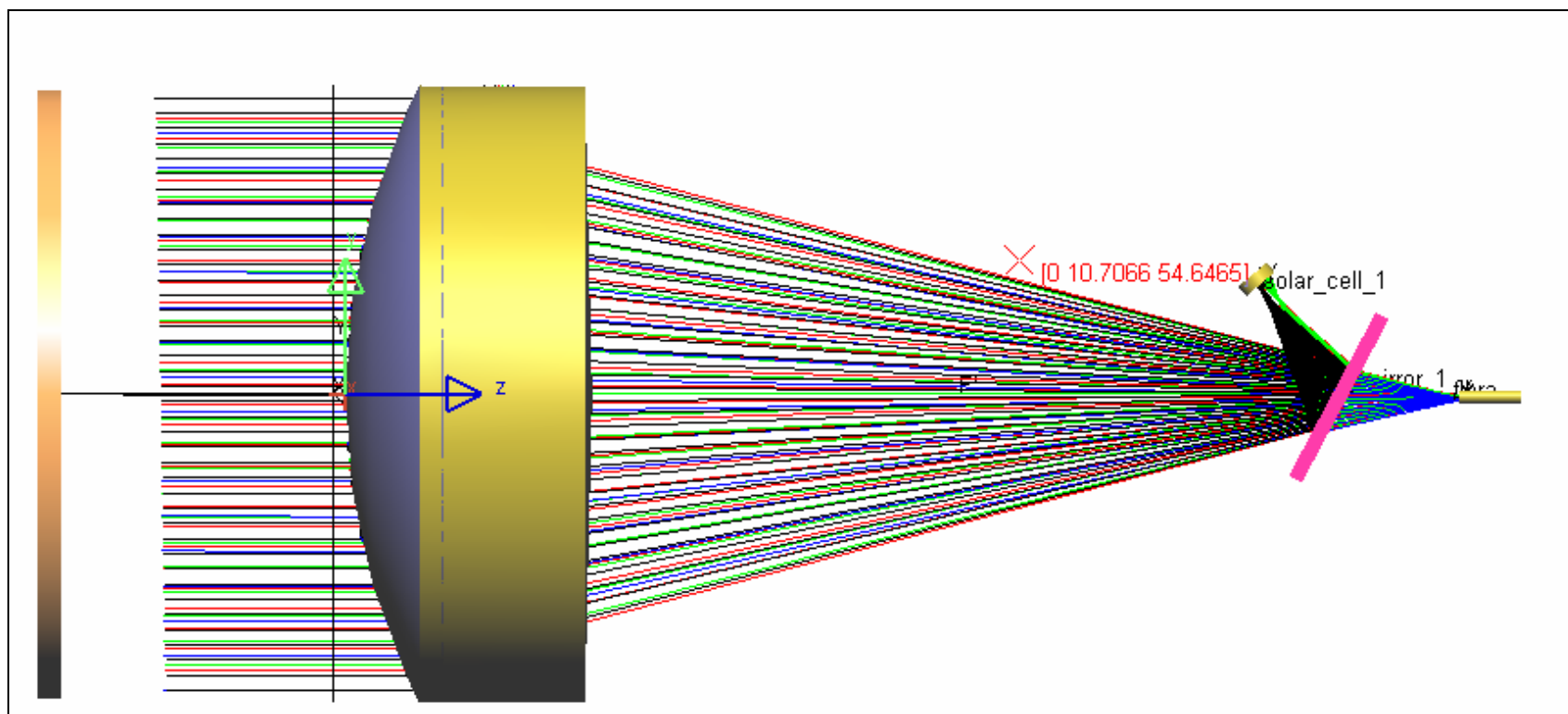


Figura 4.20 Sistema calcolato in modalità non sequenziale

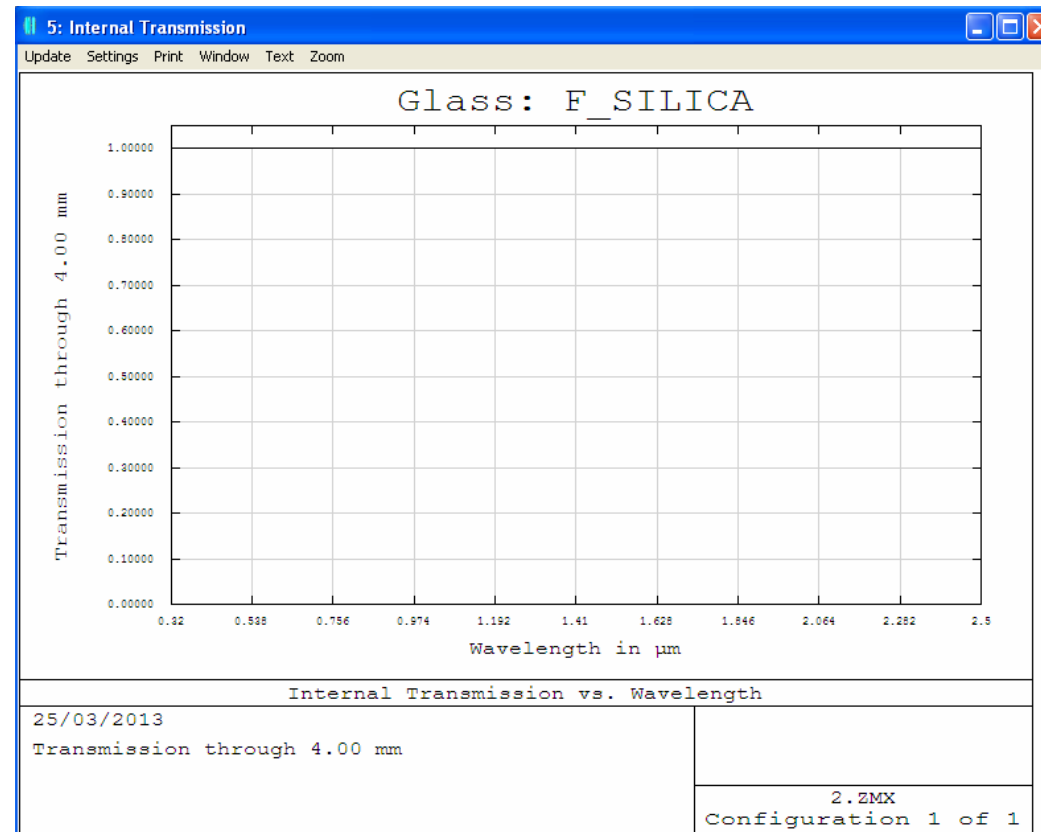


Figura 4.21 Trasmissione in funzione della lunghezza d'onda per la lamina di quarzo

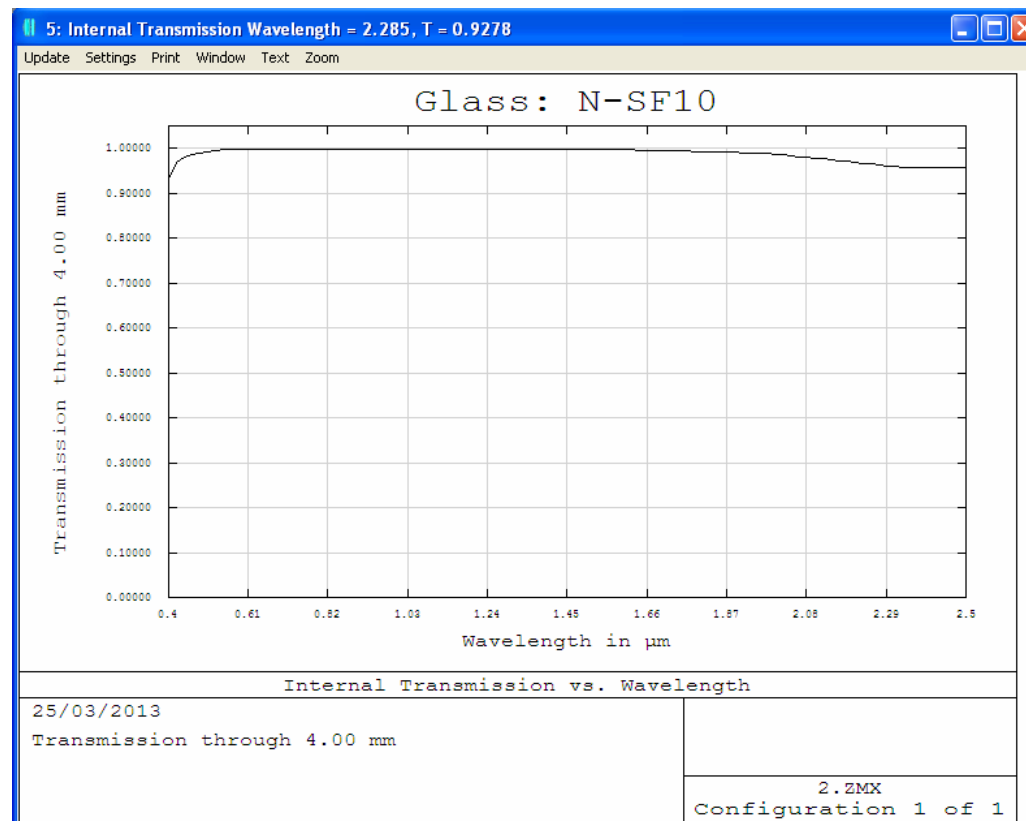


Figura 4.22 Trasmissione in fusione della lunghezza d'onda per l'N-SF10

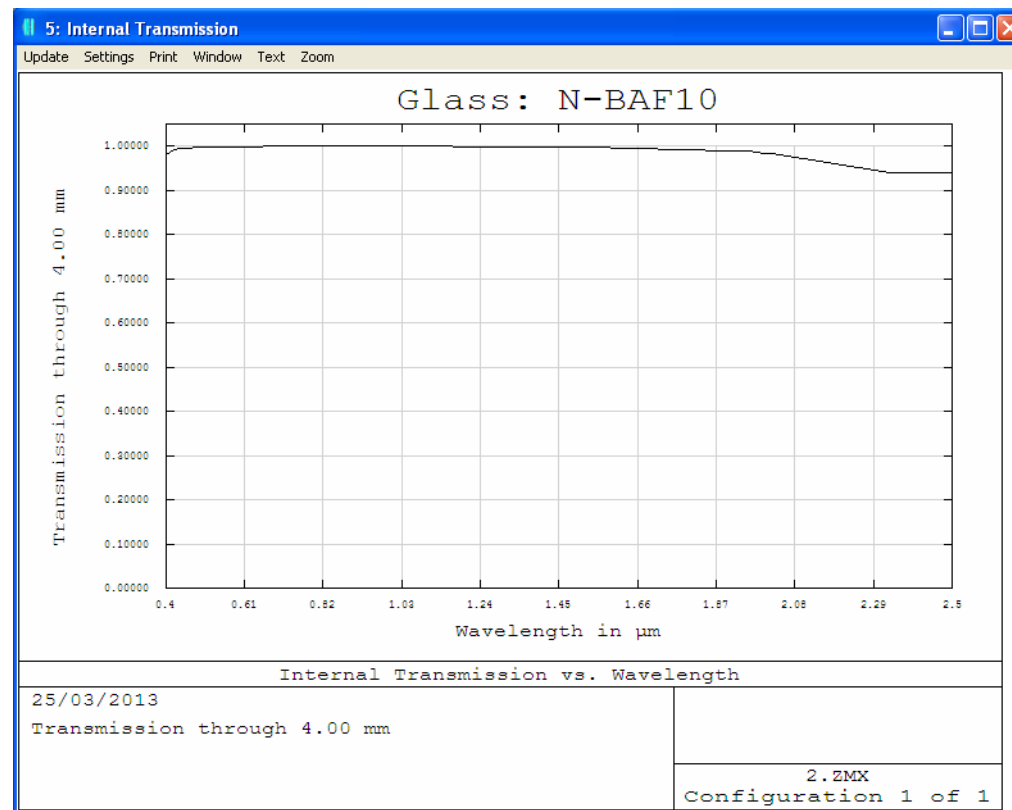


Figura 4.23 Trasmissione in funzione della lunghezza d'onda per l'N-BAF10

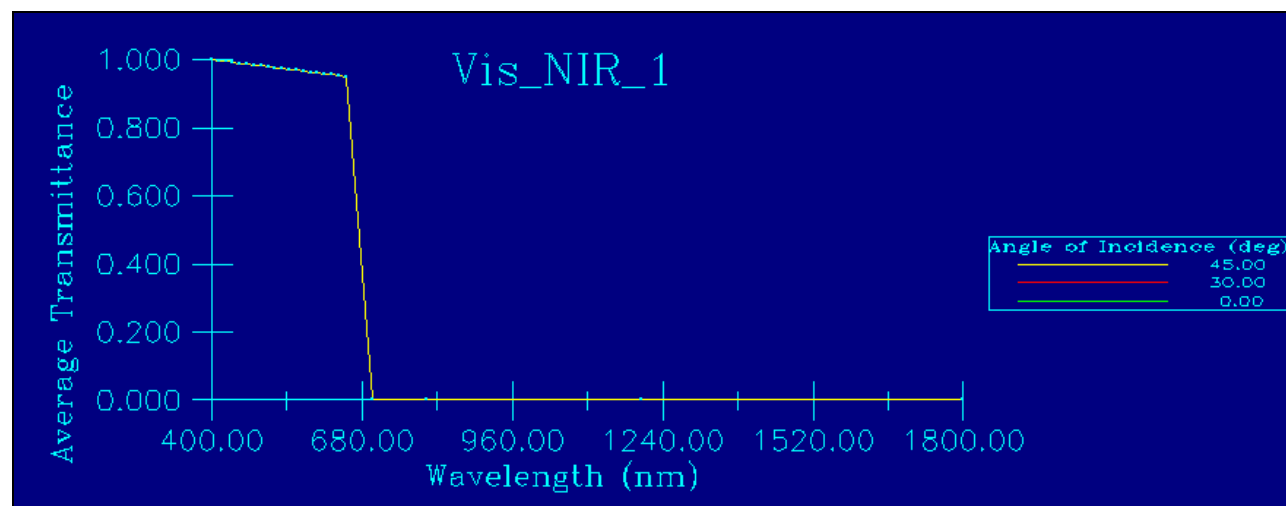


Figura 4.24 Efficienza di trasmissione del dichroico

La quantità di radiazione incidente sullo specchio dicroico è corrisponde a 1.7W che in base all'efficienza stimata per il trattamento e le curve di trasmissione dello specchio caldo (figura 4.24) viene divisa in 0.85W sulla cella e 0.54W in fibra.

Le figure 4.25, 4.26 e 4.27 mostrano la distribuzione dell'energia sulla lamina, sulla cella e sulla fibra ottica, mentre la figura 4.28 riporta le quote del sistema.

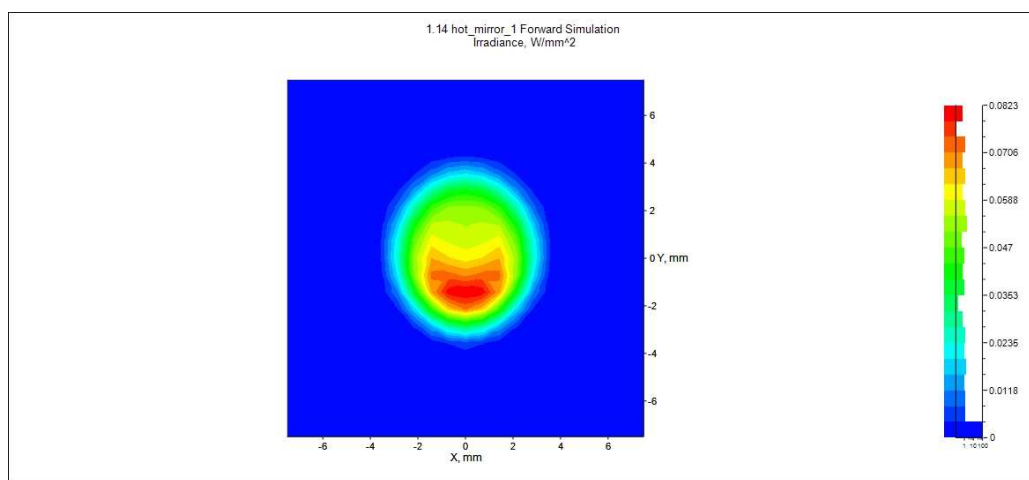


Figura 4.25 Distribuzione del flusso luminoso sullo specchio dicroico

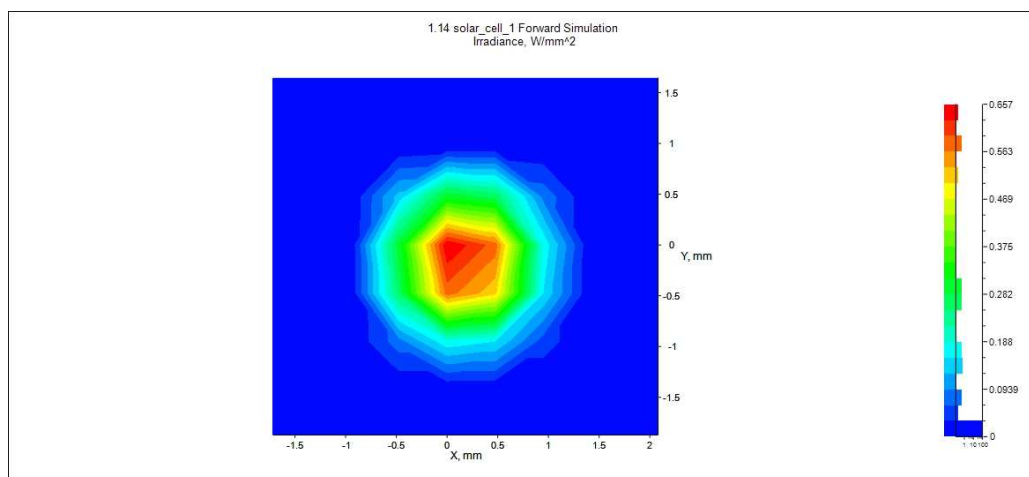


Figura 4.26 Distribuzione del flusso luminoso sulla cella fotovoltaica

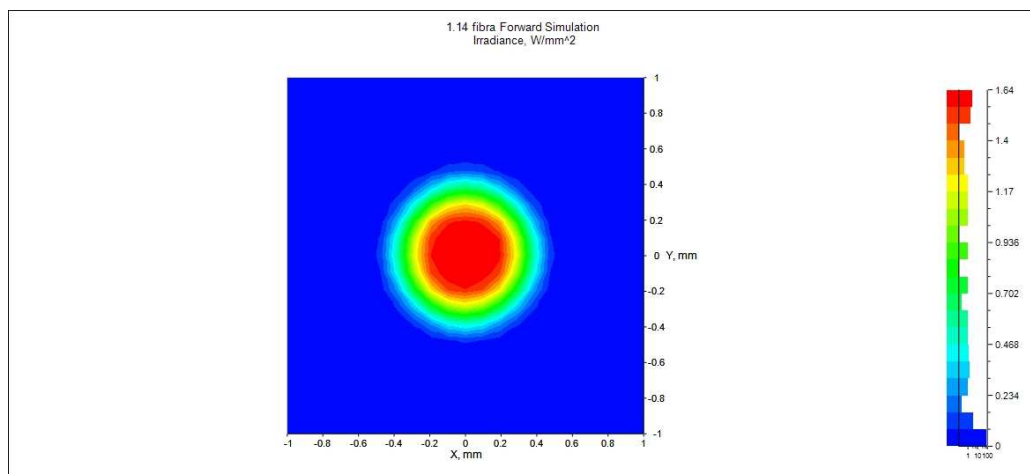


Figura 4.27 Distribuzione del flusso luminoso all'ingresso della fibra ottica

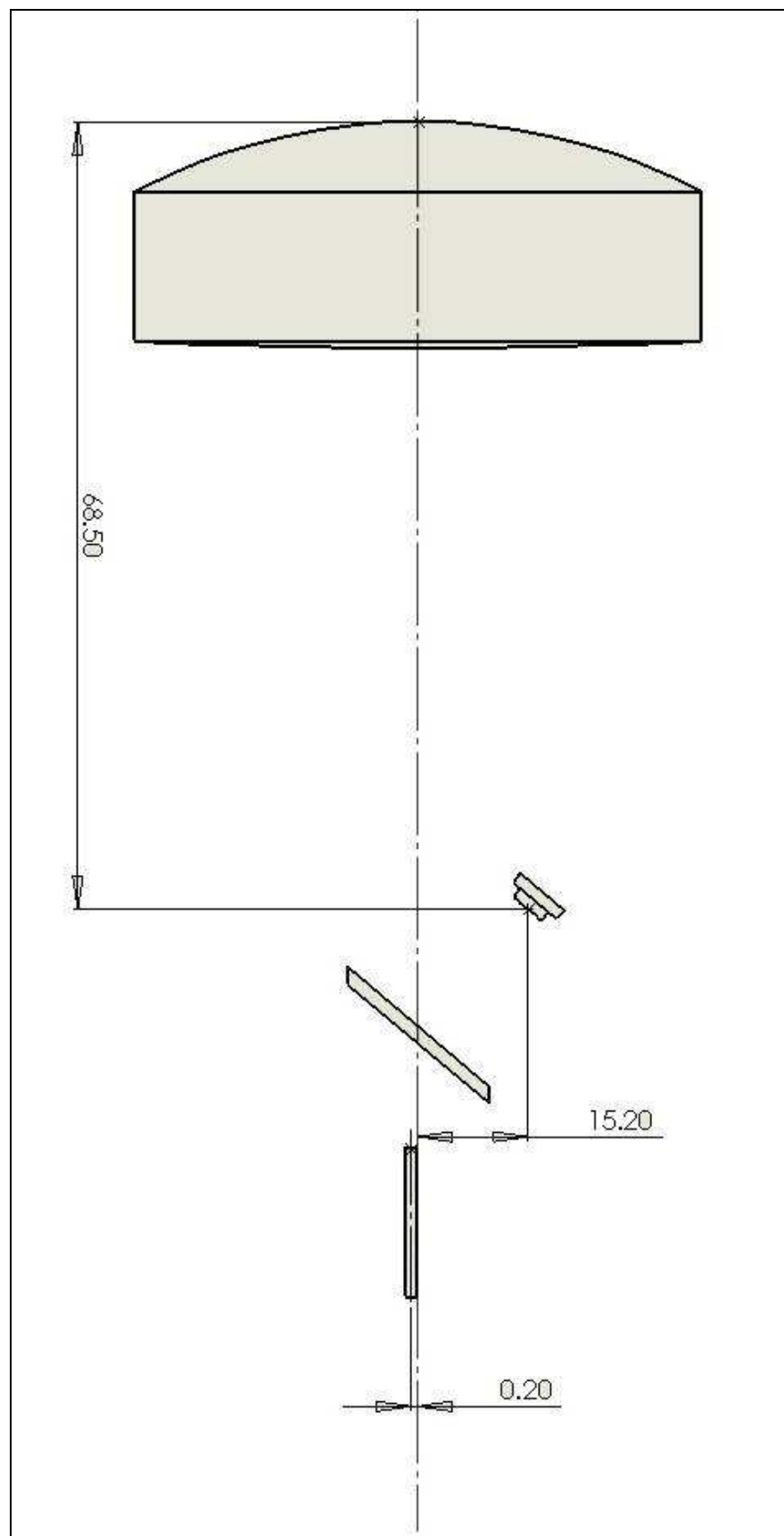


Figura 4.28 Quote del sistema

4.5 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La sintesi dei dati ottenuti definisce il rendimento medio complessivo per l'intero sistema in 0,6.

Lo schema proposto, pur non essendo caratterizzato da una risoluzione spaziale elevata come gli arrangiamenti a specchi di derivazione astronomica, utilizzati a volte, in impianti fotovoltaici e illuminotecnici[52-53], è adatto a sistemi modulari, in virtù della sua semplicità ed efficienza. Le tolleranze costruttive, unite alle possibilità di mantenere buoni rendimenti rispetto ad eventuali errori di accoppiamento tra i componenti, lo rendono un sistema adatto alla creazione di sistemi ibridi per lo sfruttamento dell'energia radiante.

Le tolleranze di allineamento con la sorgente, senza perdite notevoli di efficienza, permettono il rilassamento delle caratteristiche di precisione del sistema di puntamento, diminuendo quindi, ulteriormente, i costi complessivi del dispositivo.

La potenza trasferita alla cella fotovoltaica, stimata dalle simulazioni non sequenziali in circa 120 soli, infine, permette di far lavorare questo componente nelle sue condizioni ideali, massimizzandone, simultaneamente, il rendimento e la durata [54]

.

5 - CONCLUSIONI

I sistemi che sfruttano, in maniera diretta, la radiazione emessa dal sole, costituiscono una tipologia di dispositivi in grado di integrare la quota di energia trasformata sfruttando risorse fossili.

Una classe di questi dispositivi, è rappresentata dai concentratori solari: questi sistemi, basano il loro principio di funzionamento, sul trasferimento della radiazione intercettata verso un' area deputata alla sua conversione, sede della cella fotovoltaica. Il sistema presenta grandi possibilità di sviluppo, come testimoniato dalla forte attività di ricerca perseguita in questo campo, negli ultimi anni, in quasi tutti i paesi del mondo.

Parallelamente, l'aumento del fabbisogno di energia destinato all'illuminazione, ha orientato gli studi di una parte di ricercatori, verso dispositivi in grado di sfruttare le ottiche di raccolta dei concentratori solari, accoppiate a comuni guide di luce, per l'implementazione di sistemi illuminotecnici.

Lo sviluppo delle celle fotovoltaiche, caratterizzate da una risposta estesa alla radiazione infrarossa, unita ad un'analisi attenta delle caratteristiche delle fibre ottiche, hanno definito le basi di partenza per un sistema ibrido, in grado, sfruttando uno specchio dicroico, di trasformare la porzione di radiazione catturata in energia elettrica e, in una fonte di illuminazione.

Questa tipologia di dispositivi è idonea ad essere utilizzata all'interno delle serre per integrare la quota di energia necessaria e ottimizzarne l'illuminazione interna.

Il sistema ottico definito per il dispositivo, è stato studiato, modificato ed ottimizzato, partendo dalla sperimentazione condotta su un insieme di guide di luce, idonee alla trasmissione della radiazione visibile. La sintesi delle analisi di un modello numerico rappresentativo del sistema, analizzato attraverso la tecnica degli elementi finiti, e la comparazione con i dati sperimentali ottenuti da un prototipo costruito in laboratorio, hanno permesso, studiando le risposte termiche del sistema, di ottimizzare l'accoppiamento dei componenti con la cella fotovoltaica.

Il dispositivo proposto, considerando i valori di efficienza raggiunti, la semplicità della sua struttura e le tolleranze costruttive e di allineamento tra suoi

componenti, definisce un punto di partenza per la progettazione di impianti modulari che possono essere utilizzati per l'integrazione dell'energia richiesta dalle serre.

I limiti di funzionamento determinati, di notevole rilievo qualitativo e quantitativo, sono principalmente influenzati dallo stato dell'arte delle celle fotovoltaiche e dei trattamenti dicroici. Lo sviluppo di questi componenti, permetterà in un futuro prossimo di aumentare il rendimento dell'intero sistema, ampliando la quota di energia trasformata da dispositivi che utilizzano energie rinnovabili.

NOMENCLATURA

Abbreviazioni

NA	Apertura numerica
DOF	Gradi di libertà
CR	Rapporto di concentrazione della potenza d'ingresso
AR	Anti riflesso

Simboli

p	Pressione [bar]
T	Temperatura [K]
V	Velocità [m/s]
F	Lunghezza focale [mm]
$\varnothing$	Diametro delle lenti [mm]
Re	Numero di Reynolds
J	Irraggiamento [W/m^2]
P	Densità [kg/m^3]
u	Vettore velocità [m/s]
μ	Viscosità dinamica [$Pa \cdot s$]
C_p	Calore specifico a pressione costante [$J/(kg \cdot K)$]
q	Flusso di calore scambiato per conduzione [W/m^2]
σ	Costante di Stefan-Boltzmann [$W/(m^2 \cdot K^4)$]
DP	Spostamenti [μm]

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kreith F, Kreider JF. Principles of solar engineering. New York: McGraw-Hill; 1978.
- [2] T.M. Razykov C.S. Ferekides et al, Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects, Solar Energy 85 (2011) 1580–1608.
- [3] Meinel AB, Meinel MP. Applied solar energy: an introduction. Reading, MA: Addison-Wesley; 1976.
- [4] Kreider JF, Kreith F. Solar heating and cooling. New York: McGraw-Hill; 1977.
- [5] Chaves, Julio, Introduction to nonimaging optics. 2008, Boca Raton: CRC Press. Xxv.
- [6] Winston, Roland, et al., Nonimaging optics. 2005, Amsterdam ; Boston, Mass.: Elsevier Academic Press.
- [7] Kurtz, S., Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry (Revision), in Related Information: Supersedes February 2009 version. 2009. p. Medium: ED; Size: 32 pp.
- [8] Hering, Garrett, Staying Focused, in Photon International. 2009.
- [9] Almonacid, G., A. Luque and A. G. Molledo, Photovoltaic Static Concentrator Analysis. Solar Cells, 1984. 13(2): p. 163-178.
- [10] Miñano, Juan C., Effect of restricting the exit angle on the limit of concentration for cylindrical concentrators. Appl. Opt., 1984. 23(24): p. 4554-4559.
- [11] Luque, A. and A. Marti, Limiting efficiency of coupled thermal and photovoltaic converters. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1999. 58(2): p. 147-165.
- [12] Barnett, A., et al., Very High Efficiency Solar Cell Modules. Progress in Photovoltaics, 2009 17(1): p. 75-83.
- [13] McCambridge, James et al, Compact spectrum splitting photovoltaic module with high efficiency. Progress in Photovoltaics, 2010.
- [14] Luque, A., Photovoltaic market and costs forecast based on a demand elasticity model. Progress in Photovoltaics, 2001. 9(4): p. 303-312.

- [15] Peharz, G. and F. Dimroth, Energy payback time of the high-concentration PV system FLATCON (R). *Progress in Photovoltaics*, 2005. 13(7): p. 627-634.
- [16] Luque, A., G. Sala and I. Luque-Heredia, Photovoltaic concentration at the onset of its commercial deployment. *Progress in Photovoltaics*, 2006. 14(5): p. 413-428.
- [17] Araki, K., et al., Achievement of 27% efficient and 200 Wp concentrator module and the technological roadmap toward realization of more than 31% efficient modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006. 90(18-19): p. 3312-3319.
- [18] Leutz, R., et al., Shaped nonimaging Fresnel lenses. *Journal of Optics a-Pure and Applied Optics*, 2000. 2(2): p. 112-116.
- [19] Leutz, Ralf and Akio Suzuki, Nonimaging Fresnel lenses : design and performance of solar concentrators. *Springer series in optical sciences*,. 2001, Berlin ; New York: Springer. xi, 272 p.
- [20] Leutz, R., et al., Design of a nonimaging Fresnel lens for solar concentrators. *Solar Energy*, 1999-65(6): p. 379-387.
- [21] Ostroumov, Natalia, Jeffrey M. Gordon and Daniel Feuermann, Panorama of dual-mirror aplanats for maximum concentration. *Appl. Opt.*, 2009- 48(26): p. 4926-4931.
- [22] Crisp V.H.C., Littlefair P.J. "Daylighting as a passive solar energy option: an assessment of its potential in non domestic buildings", Report129, BRE, Garston, UK, 1998
- [23] C. Kandilli, K. Ulgen, Review and modelling the systems of transmission concentrated solar energy via optical fibres, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 67–84.
- [24] C. Ciamberlini, F. Arancini, Solar system for exploitation of the whole collected energy, *Optics and Lasers in Engineering* 39 (2003) 233–246.
- [25] Chen Wang, H. Abdul-Rahman, S.P. Rao, Daylighting can be fluorescent: Development of a fiber solar concentrator and test for its indoor illumination, *Energy and Buildings* Volume 42, Issue 5, May 2010, Pages 717–727
- [26] Hyunjo Hana, Jeong Tai Kimb, Application of high-density daylight for indoor illumination next term *Energy*, Volume 35, Issue 6, June 2010, Pages 2654-2666.

- [27] Jeong Tai Kima, Gon Kimb, Overview and new developments in optical daylighting systems for building a healthy indoor environment. *Building and Environment* Volume 45, Issue 2, February 2010, Pages 256-269.
- [28] Benton, 1986 C.C. Benton, Daylighting can improve the quality of light and save energy. *Architectural Lighting*, pp. 46–48.
- [29] H.J. Han, Y.I. Jeon, S.H. Lim, W.W. Kim, K. Chen New developments in illumination, heating and cooling technologies for energy-efficient buildings *Energy*, Volume 35, Issue 6, June 2010, Pages 2647-2653.
- [30] Gordon JM, Feuermann D, Huleihil M. Solar fibre-optic mini-dish concentrators: first experimental results and field experience. *Sol Energy* 2002;72:459–72
- [31] Allen Jong-Woei Whang, Yi-Yung Chen, Bo-Yi Wu, Innovative design of cassegrain solar concentrator system for indoor illumination utilizing chromatic aberration to filter out ultraviolet and infrared in sunlight, *Solar Energy* 83 (2009) 1115–1122.
- [32] Shouli Jiang, PengHu __, SongpingMo, ZeshaoChen, Optical modeling for a two stage parabolic trough concentrating photovoltaic/thermal system using spectral beam splitting technology, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94 (2010) 1686–1696
- [33] Comsol chemical reaction engineering module user guide v4.2a, October 2011, pages 275-278.
- [34] Juvinall – Marschek, *Fondamenti della progettazione di machine*, Edizioni ETS pag. 821.
- [35] S.B. Pope, *Turbulent Flow*, Cambridge press, 2000 pages 264-266.
- [36] Comsol Heat transfer module users guide v4.2a, October 2011, pages 238-239.
- [37] Comsol Multiphysics reference guide v4.2a, October 2011, page 521.
- [38] S.B. Pope, *Turbulent Flow*, Cambridge press, 2000 pages 373-383.
- [39] Comsol Heat transfer module users guide v4.2a, October 2011, page 242.
- [40] Comsol Heat transfer module users guide v4.2a, October 2011, pages 243-244.

- [41] Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow, B. F. Armalyt, F. Durst, J. C. F. Pereira, B. Schonung, J. Fluid Mech. (1983), vol. 127, pages 473-496.
- [42] 1st NAFEMS Workbook of CFD Examples. Laminar and Turbulent Two-Dimensional Internal Flows. Pages 38-49 NAFEMS, 2000.
- [43] J. Kim, S.J. Kline, and J.P. Johnston, "Investigation of a Reattaching Turbulent Shear Layer: Flow Over a Backward Facing Step," Transactions of the ASME, vol. 102, p. 302, 1980.
- [44] Comsol multiphysics, Heat transfer module users guide v4.2a, October 2011, page 171.
- [45] Buie, D. and A. G. Monger, The effect of circumsolar radiation on a solar concentrating system. Solar Energy. 76(1-3): p. 181-185;
- [46] Buie, D., C. J. Dey and S. Bosi, The effective size of the solar cone for solar concentrating systems. Solar Energy, 2003. 74(5): p. 417-427;
- [47] Gueymard, Christian. SMARTS - Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine 2010;
- [48] NREL: Renewable Resource Data Center - Solar Resource Data. 2010 December 29, 2009 [cited 2010 March 3];
- [49] Datasheet cella tripla giunzione AzurSpace modello 3C40 disponibile presso: <http://www.azurspace.com>;
- [50] Doppietto AR coating AC508-100-A
http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=120&pn=AC508-100-A;
- [51] Zemax Manual 2012 Cap 17 pp 483-537;
- [52] Hyunjoo Han , Jeong Tai Kim, Application of high-density daylight for indoor illumination, Energy 35 (2010) 2654–2666;
- [53] Chi-Feng Chen , Chih-Hao Lin , Huang-Tzung Jan , Yun-Ling Yang, Design of a solar concentrator combining paraboloidal and hyperbolic mirrors using ray tracing method, Optics Communications 282 (2009) 360–366;

[54] E. Skoplaki, J.A. Palyvos On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy* Volume 83, Issue 5, May 2009, Pages 614–624.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento affettuoso a GF e Lucilla.

Un altro è rivolto a tutti i ricercatori ed il personale della collina di Arcetri che mi hanno ospitato, per un lungo periodo, nei loro laboratori.

Un ringraziamento particolare all' Ing. Ciro del Vecchio, senza il cui prezioso aiuto, questo lavoro e soprattutto quelli futuri non avrebbero mai preso vita.

« Non puoi aspettarti di vedere al primo sguardo. Osservare è per certi versi un'arte che bisogna apprendere » F.W. Herschel