



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FERRARA**

**FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI**

---

**CORSO DI LAUREA IN FISICA**

**CARATTERIZZAZIONE OTTICA CON FASCIO LASER E  
SIMULAZIONE DI CONCENTRATORI SOLARI  
NON-IMAGING**

**Relatori:**

**Dott. Marco Stefancich**

**Dott. Antonio Parretta**

**Controrelatore:**

**Dott. Ferruccio Petrucci**

**Laureando:**

**Valerio Franceschini**

---

**ANNO ACCADEMICO 2006-2007**



# INDICE

## INTRODUZIONE

I.1 La radiazione solare	1
I.2 Sistemi tradizionali	2
I.3 Sistemi a concentrazione	3
I.4 Scopi del lavoro	8

## CAPITOLO 1

1.1 L'ottica nei sistemi a concentrazione	11
1.2 Vincoli teorici tra concentrazione e accettazione	13
1.3 L'ottica non-imaging per l'ottenimento della massima concentrazione ed accettazione angolare	14
1.4 La simulazione e l'approccio "ray trace"	15
1.5 Le condizioni di simulazione per la riproduzione	16
1.6 Le misure in laboratorio per la validazione delle simulazioni, approccio "puntuale" alla misura come omologo del raytrace.	17
1.7 Descrizione del sistema ottico in studio	18
1.8 Descrizione delle analisi che si intende fare sul sistema	19

## CAPITOLO 2

2.1 Introduzione	21
2.2 Misure di controllo	22
2.3 Lo studio sull'efficienza	27
2.4 Analisi angolare del fascio concentrato	46

CAPITOLO 3	
3.1 Simulazioni per la stima dell'efficienza	51
3.2 Simulazione per l'analisi dell'angolo di uscita del segnale	62
CONCLUSIONI	65
BIBILIGRAFIA	69

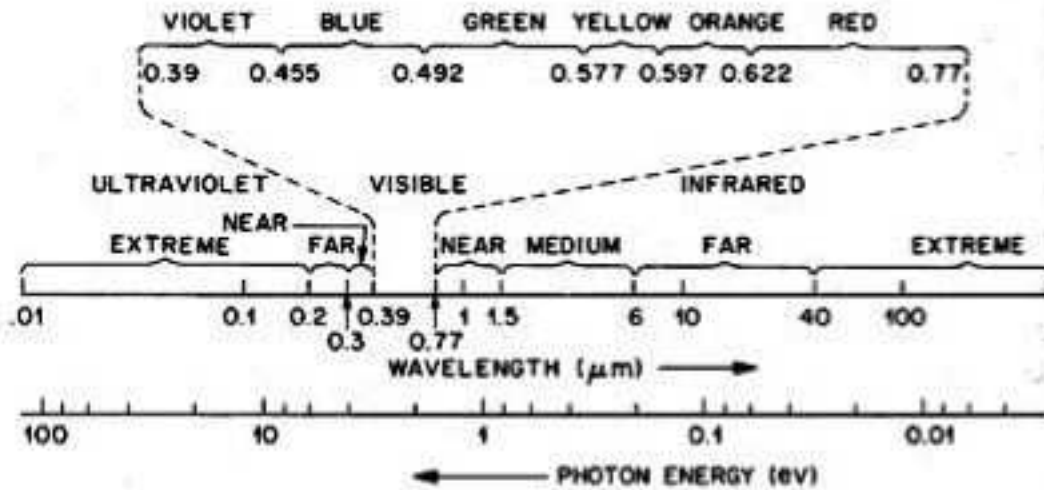
# INTRODUZIONE

## **I.1 La radiazione solare**

Il sole rappresenta una sorgente di energia praticamente inesauribile che potrebbe essere utilizzata per la produzione di energia sulla superficie terrestre. Infatti, l'energia radiativa del sole deriva da reazioni termonucleari. Ogni secondo circa  $6 \times 10^{11}$  Kg di idrogeno sono trasformati in elio con una perdita di massa di 4000 Kg, che è convertita, attraverso la relazione di Einstein  $E = mc^2$ , in  $4 \times 10^{20}$  Joule di energia. Questa energia viene irraggiata nello spazio sotto forma di radiazione elettromagnetica (Figura 1) tra 0,2 e 3  $\mu\text{m}$ , di cui lo spettro visibile si colloca fra 0,4  $\mu\text{m}$  dalla parte del blu e 0,8  $\mu\text{m}$  dalla parte rossa. Attraverso i dati disponibili sulla distribuzione della radiazione solare oltre l'atmosfera terrestre, è possibile concludere che il 7% è compreso fra 0,2 e 0,4 (nell'ultravioletto), il 42% è compreso nella zona visibile fra 0,4 e 0,8  $\mu\text{m}$  e il 51% è compreso nella zona infrarossa fra 0,8 e 3  $\mu\text{m}$ . Di tutta la radiazione solare che arriva al suolo, parte viene attenuata dalla diffusione e dall'assorbimento dell'atmosfera, risultando in un flusso di circa  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Questa potrebbe essere, se sfruttata correttamente, una delle fonti fondamentali per la fornitura di parte dell'energia elettrica consumata a ritmi crescenti nel pianeta.

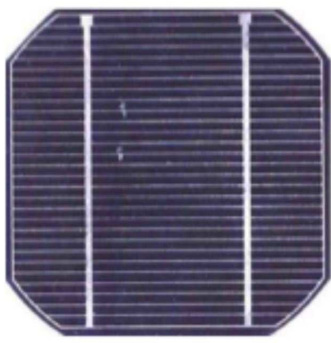
In questa tesi ci occuperemo, appunto, di una innovativa tipologia di sistemi per la conversione fotovoltaica della radiazione.



**Figura 1** Spettro della radiazione elettromagnetica

## I.2 Sistemi tradizionali

I pannelli fotovoltaici tradizionali sono un'insieme di celle fotovoltaiche collegate assieme per formare un sistema (vedi figura 2). Un grande svantaggio dei sistemi tradizionali è l'obbligo di un grande utilizzo di celle per la produzione di ingenti quantità di energia. Infatti queste, tra tutte le componenti presenti in un sistema fotovoltaico, sono quelle tecnologicamente più complesse e quindi più costose. Inoltre per avere una potenza di picco di 1 Kw occorrono circa 10 metri quadrati di pannelli fotovoltaici e ciò comporta anche un problema nel trovare lo spazio necessario per collocarli. Un altro problema dei pannelli tradizionali è il fatto che non si possono muovere e quindi non possono seguire il sole per avere sempre la massima radiazione, questo riduce in maniera drastica l'efficienza globale del sistema.



**Figura 2** A sinistra: cella fotovoltaica di lato 80x80 mm; a destra un'insieme di celle che vanno a formare un pannello fotovoltaico.

### **I.3 Sistemi a concentrazione**

Al contrario di quelli tradizionali, un sistema a concentrazione è un apparato composto un dispositivo ottico in grado di convogliare una grande intensità luminosa sopra una piccola area di celle fotovoltaiche ad alta efficienza.

Un esempio di sistema paragonabile è la comune parabola per ricezione satellitare in cui la parabola concentra, appunto, le onde elettromagnetiche provenienti dal satellite sul ricevitore radio per fornire un segnale sufficiente.

Il principio dei concentratori ottici fotovoltaici è semplicemente di utilizzare un collettore ottico di radiazione a riflessione o rifrattivo (specchio o lente), che concentri la luce solare su una ridotta quantità di celle fotovoltaiche ad elevata efficienza. La riduzione del silicio impiegato rispetto ad un sistema piano è pari alla concentrazione ottica.

La convenienza di questi sistemi rispetto ai tradizionali è basata sul fatto che è sufficiente costruire poche celle, elementi fondamentali per convertire l'energia raccolta da un'ampia superficie.

L'ampia superficie captante è invece costruita da sistemi a riflessione, lenti o altri mezzi che sono significativamente meno costosi in quanto realizzati con materiali comuni e tecnologie industriali largamente diffuse.

Come è facile da intuire però la progettazione di un tale sistema si presenta più complessa rispetto a quella di un impianto fotovoltaico piano.

Nel dettaglio, la struttura di cella si presenta più sofisticata per poter ottenere alti valori di efficienza in presenza di una maggiore radiazione solare incidente. Il modulo che ospita le celle è più complesso, sia per l'alto numero dei componenti da assemblare che per problemi di tenuta e di smaltimento del calore. E' necessario, infine, utilizzare un sistema di supporto dei moduli capace di inseguire il sole durante la giornata.

Vari esempi di sistemi a concentrazione sono stati sperimentati nei decenni passati ricorrendo alle più varie soluzioni ed accumulando un notevole, anche se poco noto, bagaglio tecnico che ne ha dimostrato la funzionalità.

Analizzando in dettaglio i componenti di un sistema fotovoltaico a concentrazione, la parte più appariscente è sicuramente il concentratore primario che ha lo scopo di concentrare la luce proveniente dal sole sul ricevitore.

Uno degli aspetti importanti dei sistemi a concentrazione è che, per operare correttamente, il sole deve trovarsi sempre sull'asse ottico del concentratore primario. Il sistema ha bisogno di un tipo di movimento per seguire il moto apparente del sole. Questo movimento per seguire il sole porta anche un vantaggio in termini di energia prodotta dal sistema poiché, al contrario dei pannelli tradizionali, il sistema offre sempre la massima superficie al sole raccogliendone al meglio l'energia. L'inseguimento garantisce una maggiore produzione di energia elettrica su base annua stimabile, alle nostre latitudini, in oltre il 30% rispetto ad un sistema piano di analoga potenza nominale. La tecnologia, sia elettronica che elettromeccanica, del posizionamento preciso di sistemi parabolici nell'ultimo decennio ha ricevuto impulso dal grande



sviluppo dei sistemi di comunicazione satellitare e dalle reti di comunicazione in microonde.

Di fatto si ricorre a sistemi già esistenti sul mercato ed impiegati per altri scopi ma per i quali con tutta probabilità sono già state fatte le dovute considerazioni nei confronti delle normative da parte di altri tecnici e studiosi.

La scelta di materiali e di composti polimerici ad alta riflettività permette poi di ottenere strutture molto leggere e facilmente producibili in larga scala. Questi materiali leggeri riducono notevolmente il peso della struttura e questo permette il raggiungimento di una migliore precisione nella movimentazione, anche superiore a  $0,1^\circ$  sull'intera escursione, adattando un sistema commerciale per la movimentazione di grandi parabole satellitari.

Le motorizzazioni possono essere controllate tramite un sistema elettronico progettato e realizzato appositamente, che, sulla base di un sensore luminoso differenziale, si allinea con la posizione solare in maniera rapida e precisa.

Lo stesso sistema controlla la produzione energetica dei moduli fotovoltaici, le temperature delle varie parti critiche del sistema, alcuni importanti dati meteorologici ed il funzionamento dei vari sistemi accessori (interruttori crepuscolari, sistema di raffreddamento, sistema di misura velocità del vento, fine corsa, surriscaldamento e stallo motori).

Se necessario è possibile memorizzare i parametri di funzionamento del sistema e trasmetterli, tramite rete dati, ad una stazione centrale di monitoraggio.

Il cuore del sistema, e la sua parte più costosa, si trova al ricevitore fotovoltaico costituito da un piccolo pannello di celle ad alta efficienza progettate per operare sotto concentrazione. Solo negli ultimi anni sono

arrivate sul mercato celle fotovoltaiche per concentrazione (anche attorno ai  $10 \text{ W/m}^2$ ) affidabili e a costo ragionevole.

Una delle problematiche costruttive più importanti è da ricondurre alle temperature di esercizio del sistema. E' infatti opportuno limitare ai  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  la temperatura massima raggiunta dalle celle fotovoltaiche. In campo elettronico, con lo sviluppo delle nanotecnologie, è stato proprio il raffreddamento il maggior impedimento al progresso. Gli sforzi negli ultimi tempi si sono prodigati in questa direzione giungendo allo sviluppo di una tecnologia affidabile che ha permesso la produzione su larga scala di sistemi termicamente più robusti e di ottime prestazioni che possono essere impiegati nei sistemi a concentrazione.

Le alternative possibili sono essenzialmente due : ad aria e ad acqua. La prima rende il sistema decisamente più snello e di più semplice progettazione, non è necessario interconnettere il generatore d'aria con il sistema mobile del concentratore, ma il suo funzionamento richiederebbe un dispendio di energia. La seconda alternativa, nonostante complessità progettuali e costruttive maggiori, offre la possibilità di riutilizzare il calore dissipato come fonte di produzione di acqua calda per uso civile oppure potrebbe integrarsi in un ulteriore sistema di generazione di energia.

Per il proseguimento della trattazione tralasciamo la scelta di una di queste due alternative, che andrebbero ad appesantire lo studio introducendo problematiche la cui analisi ci porterebbe ad allontanarci dagli scopi prefissi, considerando che l'una o l'altra ipotesi utilizzerebbero comunque la medesima struttura di base.

(queste parti introduttive sono tratte dalla tesi di Gandini Mattia dell'Anno Accademico 2005-06)

## **I.4 Scopi del lavoro**

Una volta che si sia determinata la forma del collettore solare primario è necessario caratterizzare i prototipi realizzati per verificare, nella realtà, come il dispositivo si comporti.

Lo scopo ultimo di questo lavoro è la ricerca e lo studio di un metodo di caratterizzazione ottica facilmente applicabile ai concentratori solari applicati al fotovoltaico per determinarne le caratteristiche di concentrazione ed accettazione che, a loro volta, ne determinano l'utilizzabilità a fini fotovoltaici.

Data la varietà dei possibili concentratori la prima difficoltà è quella di riuscire ad ottenere un metodo che possa adattarsi alle varie possibilità.

I due parametri più importanti in questo ambito sono il valore di efficienza, nel senso di quanta luce viene persa durante il processo di concentrazione e lo studio dell'angolo limite, ovvero a che angolo il sistema concentratore perde di significato.

Infatti a livello teorico si studiano solo situazioni dove i raggi impattano con l'angolo migliore possibile, nella realtà, purtroppo, ci sono discrepanze su questo angolo. Diventa quindi importante sapere fino a che margine di precisione si può lavorare sull'angolo di lavoro. Questo margine indica il livello di precisione che deve avere il sistema di puntamento, quindi è un parametro molto importante anche a fini economici.

Se poi uno studio di tale genere fornisce informazioni ulteriori come una possibile via di miglioramento allora non può essere altro che particolarmente apprezzato, pur non essendo nello scopo principale.

I concetti fisici per lo studio sono ottica geometrica e la teoria della concentrazione. Nel nostro caso viene caratterizzato un concentratore CPC, quindi è necessario spiegare cosa si intende per ottica non-imaging.

Altre informazioni necessarie per questo lavoro sono una conoscenza di Excel ed Origin per la trattazione dei dati, l'uso di LabView per il sistema di acquisizione dei dati direttamente sul computer e quello del TracePro per tutto il lavoro di simulazione delle proprietà ottiche e un controllo sulla qualità del lavoro svolto in laboratorio tramite software.

## CAPITOLO 1

### **1.1 L'ottica nei sistemi a concentrazione.**

Una tecnologia emergente nel panorama dell'energia elettrica fotovoltaica sembra essere quella della concentrazione solare. Il concetto di fondo è estremamente semplice, essere in grado di convogliare grosse quantità di luce su celle di elevata efficienza e possibilmente ottenere un sistema che inseguia il sole in modo che rimanga pienamente efficiente per tutto il periodo di luce. Ci sono molte possibilità sulla concentrazione, per esempio l'uso di specchi parabolici, ma tutta l'ottica legata agli specchi ha il difetto di avere un fuoco dove convoglia tutta la luce, le apparecchiature fotovoltaiche per lavorare in buone condizioni hanno bisogno, al contrario, di una distribuzione uniforme di energia sulla loro superficie.

In più, gli spessori di lenti e specchi creano aberrazioni che non possono che mettere in difficoltà l'intero sistema.

Il CPC (Compound Parabolic Concentrator), prodotto dell'ottica non-imaging, al contrario, non ha un fuoco, anche se comunque tende a convogliare la maggior parte della luce in una zona. Questo ci permette di supporre possa essere un sistema di concentrazione preferibile. Inoltre, sulla base di considerazioni teoriche fondamentali, il concetto di concentratore non-imaging, che verrà nel seguito meglio definito, permette di ottimizzare il rapporto tra concentrazione ottica ed accettazione angolare del sistema.

L'etendue è una proprietà di un sistema ottico, che caratterizza quanto la luce viene "sparsa" in area e angolo a causa delle trasformazioni del fascio nel sistema. Questo valore è importante perché non aumenta mai in nessun sistema ottico (è un po' l'analogo dell'entropia in un sistema meccanico... cambiato di segno!). Un sistema perfetto produrrà un'immagine con la stessa

etendue della sorgente. In altre parole è un indicatore di quanto, del flusso entrante, può essere utilizzato da un sistema ottico come un concentratore, a livello teorico. Questo implica che è un fattore teorico, impossibile da superare, quindi un ottimo mezzo per verificare la bontà delle proprietà ottiche di un oggetto.

Altri nomi di questa sono accettazione, throughput, light-grasp e collecting power.

Altro parametro di cui si deve prestare attenzione è il Concentration Ratio,  $C$ , concepito come il rapporto tra la superficie di ingresso della luce e quella di uscita, dove tra le due superfici esiste un concentratore. Il valore massimo raggiungibile a livello teorico, per oggetti tridimensionali con un asse di simmetria, è

$C=1/\sin^2\vartheta$ . Dove con  $\vartheta$  si intende l'angolo di inclinazione tra raggio entrante e normale alla superficie di ingresso.

## **1.2 Vincoli teorici tra concentrazione ed accettazione.**

Il vincolo tra accettazione ottica e concentrazione può essere derivato dal secondo principio della termodinamica.

In particolare se si assume di poter violare il limite  $C=1/\sin^2\vartheta$  la conseguenza è che, utilizzando un corpo nero ideale come sorgente e un altro come ricevitore, che il flusso per unità di area sulla superficie del ricevitore potrebbe eccedere quello della sorgente e, conseguentemente, la temperatura del ricevitore potrebbe eccedere quella della sorgente (la temperatura di equilibrio, ignorando gli effetti di conduzione e convezione, è infatti determinata dalla legge di Stephen-Boltzman e lega la temperatura al flusso

di energia per unità di area) portando, appunto, ad una violazione diretta del secondo principio.

È interessante notare come un limite nel campo dell'ottica possa essere derivato da un limite fondamentale in un settore della fisica completamente differente.

Si deve, tuttavia, osservare che tale limite tra accettazione e concentrazione non è raggiunto, tranne che in casi particolari, da sistemi ottici tradizionali che formano una immagine della sorgente.

In questo caso la dimostrazione è molto complessa e parte dall'analisi dello specifico sistema ottico ma, in termini generali, si può osservare come un sistema "imaging" non si limiti a "trasferire" l'energia del fascio entrante ma ne mantenga anche altre caratteristiche, che permettono di formare l'immagine, quali la continuità dell'immagine di una sorgente continua (ad es, l'immagine di un segmento è, a parte un numero finito di punti, un oggetto continuo).

Appare quindi evidente come i sistemi imaging siano una sottoclasse, ristretta ed affetta da vincoli geometrici superiori, rispetto ad una più ampia classe di sistemi ottici "geometrici" che si limitano a conservare l'etendue.

Una più larga sottoclasse di tali sistemi, che non conserva l'immagine ed è per tanto detta "non-imaging", permette di raggiungere il limite teorico tra concentrazione ed accettazione.

### **1.3 L'ottica non-imaging per l'ottenimento della massima concentrazione ed accettazione angolare.**

In questo tipo di sistemi ottici il design è orientato esclusivamente a far confluire ogni singolo raggio luminoso dalla sorgente a qualche punto del ricevitore senza preoccuparsi della formazione di una immagine specifica.

Un esempio di tali sistemi è il seguente CPC, acronimo di Compound Parabolic Concentrator. Studiato per estrarre un fascio concentrato dopo solo una collisione senza nessuna specifica sull'angolo di uscita o sulla possibilità di avere un fuoco.

Il principio di base che sottende il design di tale tipo di sistemi ottici è detto "principio dei raggi periferici" ed è stato applicato inizialmente nei lavori del Prof. Roland Winston.

Il principio dei raggi periferici (edge rays principle) è la chiave dell'ottica senza immagine e di quella che oggi è chiamata "tailored optics" in cui il sistema ottico è disegnato partendo dalla conoscenza della sorgente e dai desideri sul profilo di illuminazione. Questo principio afferma semplicemente che ogni superficie ottica continua e derivabile con derivata continua ridistribuisce la luce in maniera continua mappando, cioè, raggi adiacenti dalla sorgente in raggi adiacenti sull'immagine.

Questo forma ciò che matematicamente è definito una mappa topologica. Quindi, per garantire che tutti i raggi dalla sorgente siano trasferiti sul bersaglio è sufficiente assicurarsi che i raggi provenienti dai bordi della sorgente (edge rays) siano mappati sui bordi del bersaglio.

Questo approccio ha l'ulteriore vantaggio di imporre il minimo numero di vincoli morfologici alla forma dell'illuminazione sul bersaglio il che permette di raggiungere le massime efficienze teoriche di trasferimento dell'energia sul target date le specifiche caratteristiche ottiche della sorgente.

Questo è stato dimostrato sperimentalmente dal Prof. Roland Winston che nel 1988 riuscì a concentrare la luce solare ad un livello di 56000 volte, molto vicino al limite teorico termodinamico, con un sistema non-imaging.



Visto che ciò che interessa nella concentrazione solare a fini energetici è, appunto, il trasferimento energetico ottimale l'ottica senza immagine è, conseguentemente, un approccio del massimo interesse.

#### **1.4 La simulazione e l'approccio "ray trace".**

La simulazione ottica, effettuata tramite opportuni programmi, del comportamento del sistema è finalizzata a riprodurre le condizioni della analisi sperimentale per confrontare, appunto, i risultati teorici con quelli pratici. Questo può servire anche come indice di qualità della realizzazione pratica del dispositivo.

In realtà, tramite software dedicato, si possono ottenere una grande quantità di informazioni, sia dal punto di vista pratico che su quello teorico che possono anche essere usate, prima della realizzazione del prototipo, per ottimizzarne le caratteristiche.

Le banche dati del programma TracePro per esempio forniscono una vasta scelta di tipologie di materiali e una possibilità quasi illimitata di fonti di luce. Questo permette di ottenere le prime informazioni evitando lunghi lavori in laboratorio e la possibilità di mirare quest'ultimo su indagini più specifiche, su particolarità emerse al computer.

Altro mezzo estremamente potente del TracePro è la possibilità del "ray trace". Questo significa che è possibile seguire l'evoluzione di un singolo raggio e non di tutta la quantità di energia che viene immessa nel concentratore. Questa possibilità è un mezzo estremamente potente quando gli scopi della simulazione non sono solo lo studio di un oggetto, ma la sua miglioria perché permette con semplicità di estrarre informazioni sul comportamento puntuale dell'oggetto. Anche se in ultima analisi serve

sempre un riscontro reale per ottenere conferme e quindi intraprendere una strada anziché un'altra.

### **1.5 Le condizioni di simulazione per la riproduzione.**

Durante la caratterizzazione uno degli scopi della simulazione è giudicare l'attendibilità di risultati di laboratorio. Questo ha posto delle condizioni restrittive su come organizzare il lavoro.

Principalmente non si è ritenuto corretto scostarsi rispetto all'approccio del laboratorio, quindi il fascio simulato entrante nel CPC non sarà simile a quello solare, ma avrà le stesse caratteristiche di quello impiegato nei test di laboratorio, ovvero una griglia generatrice di raggi identici e paralleli tra loro. Per quello che riguarda il concentratore in sé, si è cercato di renderlo il più vicino possibile a quello reale, sia come dimensioni che come materiali.

### **1.6 Le misure in laboratorio per la validazione delle simulazioni, approccio "puntuale" alla misura come omologo del raytrace.**

Il laboratorio è il mezzo principale della caratterizzazione e per questo è stato fondamentale interrogarsi, prima di iniziare, su cosa studiare e come.

Le modalità sono rivolte anche a sfruttare il più possibile le potenzialità della simulazione. Per questo l'uso di un laser è sembrata la scelta più opportuna. Prima di tutto la facile reperibilità dei mezzi possono rendere un metodo di caratterizzazione più appetibile di altri. In realtà però il vero motivo di questa scelta è che con questo si può ottenere un "ray trace" anche in situazione reale.

Un approccio puntuale nella caratterizzazione del concentratore in effetti, oltre a ottenere comunque dati d'insieme, permette il controllo di piccole

porzioni di superficie e la possibilità di seguire il raggio dall'origine fino al suo assorbimento.

Va detto comunque che la larghezza del fascio utilizzato è maggiore di 2 mm, questo per evitare un'analisi eccessivamente puntuale con quindi forti sbalzi e una probabile bassa riproducibilità. Infatti questa situazione permette di mediare una porzione abbastanza grande della superficie ottica per evitare che piccole imperfezioni rendano il dato inservibile, pur rimanendo abbastanza piccola da poter essere definita puntuale.

### **1.7 Descrizione del sistema ottico in studio.**

Il concentratore rappresentato in figura è composto da due metà speculari attaccate assieme, per facilitarne la costruzione. Ha un'apertura quadrata di 100 mm di lato, non consona con le comuni forme dei CPC, per favorire l'impacchettamento di più concentratori per ottenere il sistema complessivo di concentrazione solare.

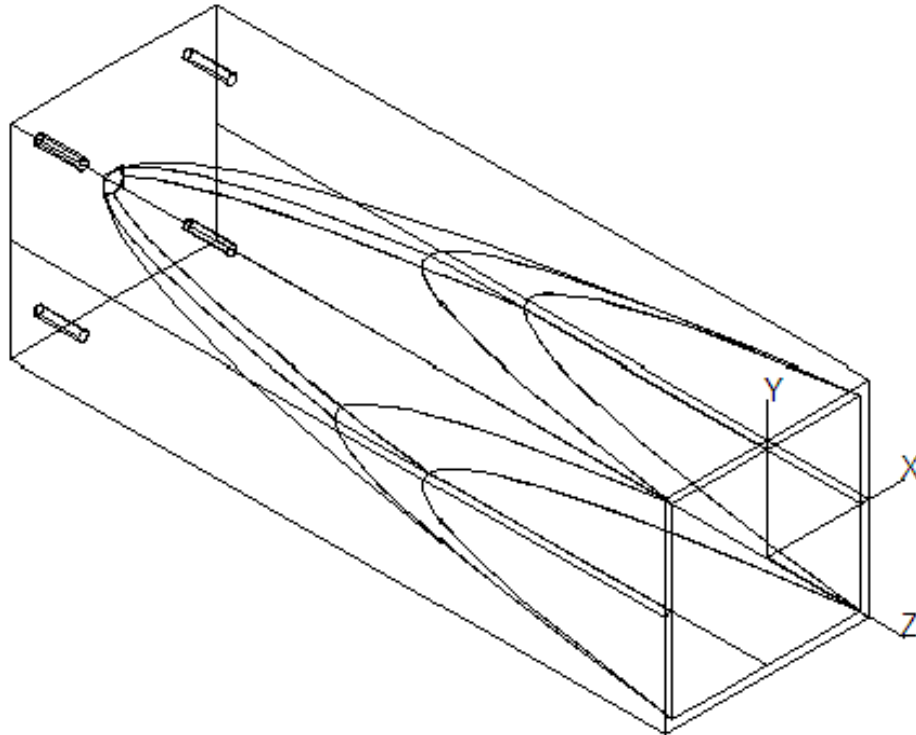


Figura 3

Il prototipo è rivestito all'interno da una pellicola 3M ed ha una profondità di 350 mm. E' dotato, nella parte posteriore, di un foro di uscita centrale, di forma circolare con diametro di 10 mm.

### **1.8 Descrizione delle analisi che si intende fare sul sistema.**

Prima di tutto in laboratorio occorrono una serie di indagini preparatorie, in modo da definire meglio la linea da seguire. In questo caso quindi sono state fatte prove sull'influenza della polarizzazione e controlli di trasmittanza angolare sulla pellicola riflettente all'interno del CPC.

Quello che si vuole ottenere principalmente è l'efficienza del CPC, sia in condizioni ideali di ingresso del raggio, che con varie inclinazioni e ricercare quindi anche l'angolo limite.

Come efficienza si intende semplicemente il rapporto, raggio per raggio, tra la potenza entrante e quella che viene raccolta all'uscita del concentratore.

Tale parametro è affetto sia dalle perdite per riflessione del materiale usato che dalle perdite per diffusione, in caso di riflessione non speculare, e per l'eventuale "rifiuto" del raggio da parte del collettore.

Per questo si pennella la superficie riflettente del concentratore con raggi a vari angoli e, grazie alla possibilità di "ray trace" si ricercano le mappe di efficienza in base alla posizione d'ingresso del laser.

In seguito si vuole studiare l'andamento dei raggi all'uscita del concentratore. Verificare se, come specificato a livello teorico, alcuni raggi escono con angoli vicini ai  $90^\circ$  rispetto alla normale al piano di uscita. Il metodo è sempre quello dello scandaglio con il laser mentre la valutazione angolare verrà fatta con l'aiuto di una semisfera.

Dopo di ciò vanno verificati i dati recuperati, quindi iniziano le simulazioni con TracePro.

Prima di tutto vengono riprodotte le stesse condizioni del laboratorio e ricalcolate le efficienze a tutti gli angoli valutati in precedenza.

A questo punto si incrociano i dati e si motivano le differenze.

Per quanto riguarda poi le valutazioni angolari si utilizza lo stesso principio.

Le analisi e le differenze verranno poi spiegate in dettaglio in seguito, mano a mano che verranno affrontate le diverse situazioni.

## CAPITOLO 2

### **Introduzione**

In questo capitolo descriviamo la metodologia sperimentale e le attrezzature impiegate per i test ottici sul sistema di interesse. In particolare la finalità delle misure qui presentate è di valutare sperimentalmente l'efficienza di raccolta e concentrazione luminosa del sistema in studio sotto diverse condizioni di incidenza della radiazione luminosa. Il capitolo si apre con una descrizione del sistema sperimentale e di un set di misure di controllo effettuate per verificare l'affidabilità del set-up medesimo. Segue poi la descrizione delle misure vere e proprie e dei risultati ottenuti.



Figura 4

## 2.2 Misure di controllo

Il set-up sperimentale consiste in un laser montato su una coppia di slitte per inviare il raggio con angolo desiderato sul collettore da analizzare. Il laser in utilizzo è un Melles Griot 05-LHP321 rosso con una lunghezza d'onda di 633 nm con una potenza di 5 mW. E' posizionato su di una slitta verticale, in modo da avere la possibilità di escursioni in altezza di rotazioni (fig. 1). Questa poi è dotata di un sistema di rotazione lungo l'asse verticale, con possibilità di fissaggio della posizione.

Il sistema è poi montato su un'altra slitta, questa volta orizzontale, in modo da avere libertà di movimento su tutte le due dimensioni necessarie.

Il concentratore, costituito da due metà speculari adese tra loro, è ricoperto internamente di una pellicola riflettente ed è posizionato su di un porta campione fissato al banco ottico e con la possibilità di ruotare l'oggetto su di un piano perpendicolare al banco stesso e parallelo al piano dell'ingresso del concentratore.

Prima di tutto, temendo che ciò potesse influire con lo studio, si è controllata la polarizzazione del laser, risultata molto marcata.

Per questo sono state eseguite una serie di misure di test sulla stessa zona del concentratore ottico da analizzare con la medesima inclinazione del fascio, ma ruotando il laser di  $90^\circ$  su sé stesso per verificare quanto la polarizzazione potesse influire sulle misure (figura 2). All'uscita del concentratore (d'ora in avanti semplicemente CPC) è stata posta una cella fotovoltaica di cui si è misurata la corrente di corto circuito che è proporzionale all'illuminazione. L'intensità in asse y di Fig. 2 è la corrente generata da tale celletta.

L'asse x è la posizione del laser, l'escursione tra 240 mm e 340 mm è semplicemente la lettura sul righello della slitta orizzontale, i 100 mm in cui

il segnale di uscita della cella è non nullo coincidono con la grandezza dell'apertura del concentratore.

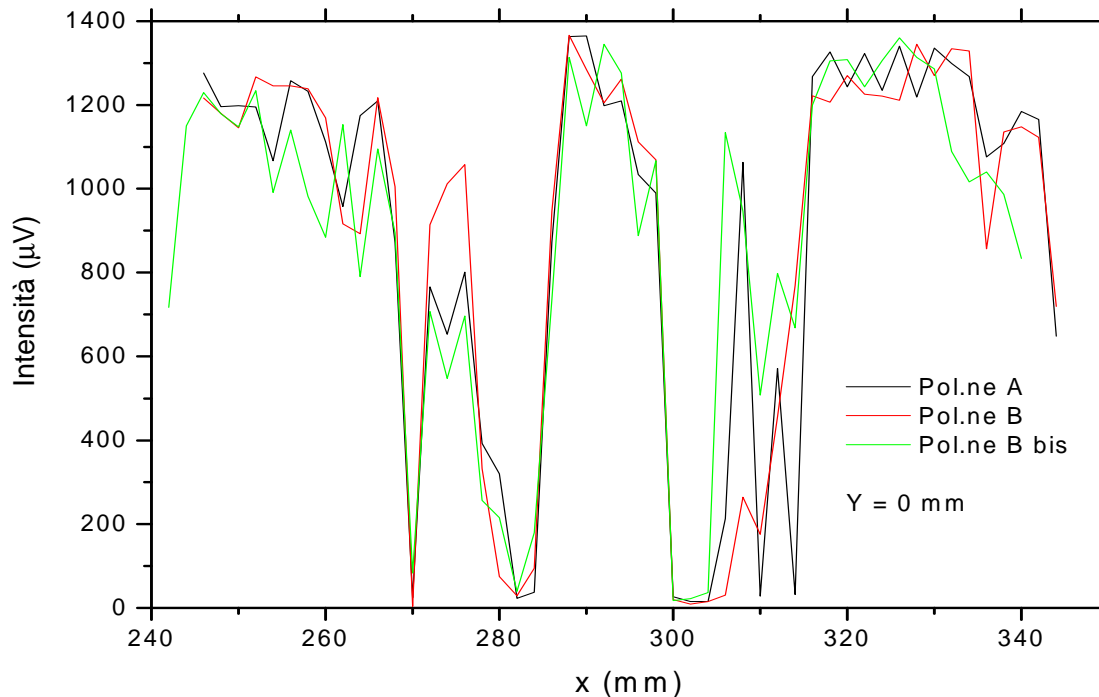


Figura 5

Si nota immediatamente come il grafico definito con polarizzazione A sia assolutamente paragonabile agli altri 2, in posizione B. I punti di disaccordo sono da imputare agli inevitabili errori nel posizionamento del laser e alla vicinanza di imperfezioni nel film.

Comunque la discrepanza più forte compare nelle due misurazione B attorno ai 275 mm, con la A che si pone in una posizione intermedia, quindi ideale per dimostrare la bassa influenza.

Sempre nell'ambito dei test sulla polarizzazione e per poter valutare le vere proprietà dei materiali, si sono fatte misure di riflettanza angolare su di un campione di pellicola 3M (identica di quella presente nel prototipo) applicata ad un oggetto rettangolare liscio dello stesso materiale del CPC. Gli angoli tra la normale alla superficie e il fascio variano di  $10^\circ$  in  $10^\circ$  a partire da  $10^\circ$



fino a  $80^\circ$ . Ogni 2 angoli viene fatta una misura definita diretta, con fascio perpendicolare al campione, la media di questi dati fornisce il fattore di normalizzazione per calcolare l'efficienza percentuale della pellicola. Per catturare la luce riflessa dal campione è stato usato un fotodiode Coherent LM-1.

La misura viene poi ripetuta nel medesimo modo a polarizzazione invertita per valutare se in questo caso ci sono variazioni significative.

Per motivi di simmetria e di completezza di misura, le rotazioni avvengono sia verso sinistra che verso destra.

In questo modo si cerca di verificare se la riflettanza del film è suscettibile di variazioni a causa di polarizzazioni e di angoli di incidenza.

Il risultato finale si può riassumere in una debolissima dipendenza dalla polarizzazione. Infatti, controllando i grafici (figure 3 e 4), una delle due possibili polarizzazioni ha un valore percentuale tendenzialmente più alto, anche se mai di un valore superiore al 5%. Rimane comunque chiaro che l'andamento dei grafici appare il medesimo.

Di rilievo anche una buona stabilità nella percentuale per angoli fino a  $70^\circ$  circa, che dimostra una quasi inesistente dipendenza rispetto all'angolo di incidenza fino a quelle angolazioni.

Purtroppo in seguito i valori calano vistosamente. Questo effetto, che non si riteneva esistere, potrebbe contribuire al divario di efficienza tra teoria e dati di laboratorio.

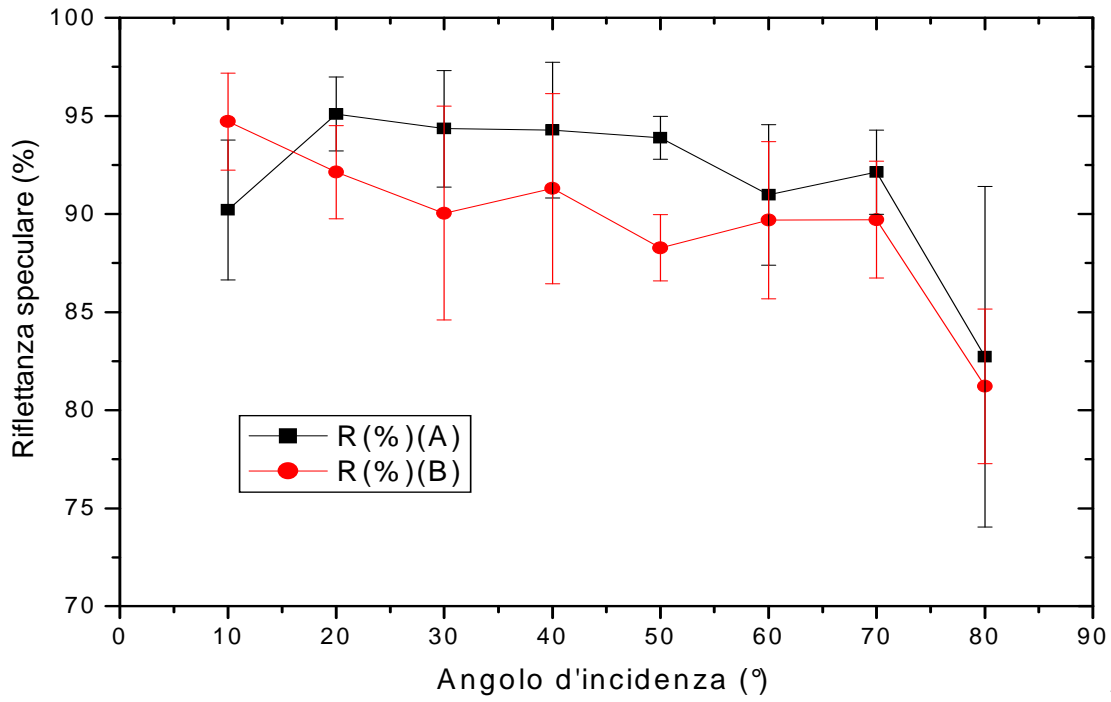


Figura 6

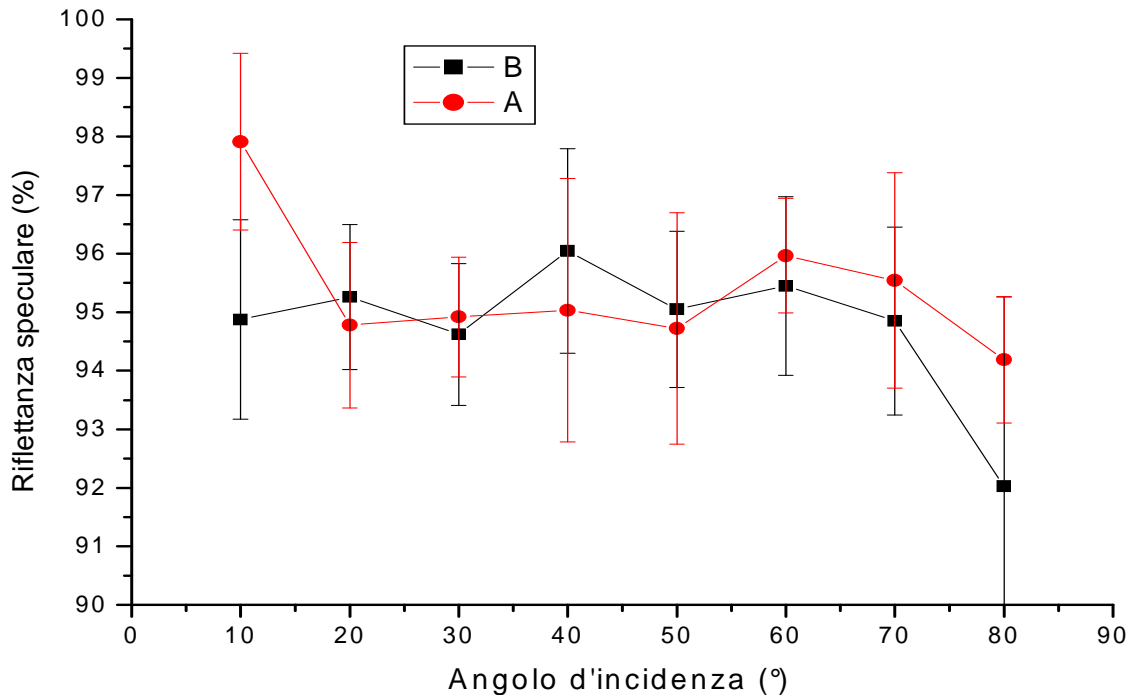


Figura 7

Dopo queste prove, la polarizzazione è stata reputata non abbastanza influente sulle misurazioni da costringere ad allargare lo studio di ogni

situazione inserendo anche questa variabile. Questo avrebbe significato un raddoppio delle misurazioni necessarie.

In aggiunta questa serie di controlli preparatori ha evidenziato un'ottima riproducibilità, fattore che si presuppone rimanga tale per tutto il proseguimento del lavoro, data la similitudine di approccio tra questi test e le misure vere e proprie.

### **2.3 Lo studio sull'efficienza**

Una volta in condizione di poter ottenere misure accettabili il primo obiettivo è stato il calcolo dell'efficienza in base all'angolo di incidenza e alla posizione d'ingresso. Per questo si è scelto di pennellare con il laser la superficie riflettente del CPC, avente una finestra di ingresso di 100x100 mm, con un passo di 2mm orizzontalmente e di 4 mm verticalmente, in modo di ottenere sia un'analisi puntuale che una mappa dell'oggetto. Dato la larghezza del fascio di circa 2 mm, una misura del genere ottiene una media di una piccola porzione di oggetto, riducendo l'effetto indesiderato delle eventuali piccole imperfezioni nella superficie. Questo, unito al numero di punti della griglia, 50x25, permette di ottenere una buona media dell'efficienza reale dell'oggetto (figura 5).

E' stata poi presa la misura tramite una cella SunPower HECO 252, posizionata sull'uscita dello strumento e collegata ad un amperometro Keithley 199 a sua volta collegato ad un PC portatile tramite uscita digitale. L'acquisizione dei dati avviene tramite un programma elaborato con LabView, le misure sono, quindi, escludendo quelle percentuali, in mm e  $\mu V$ .

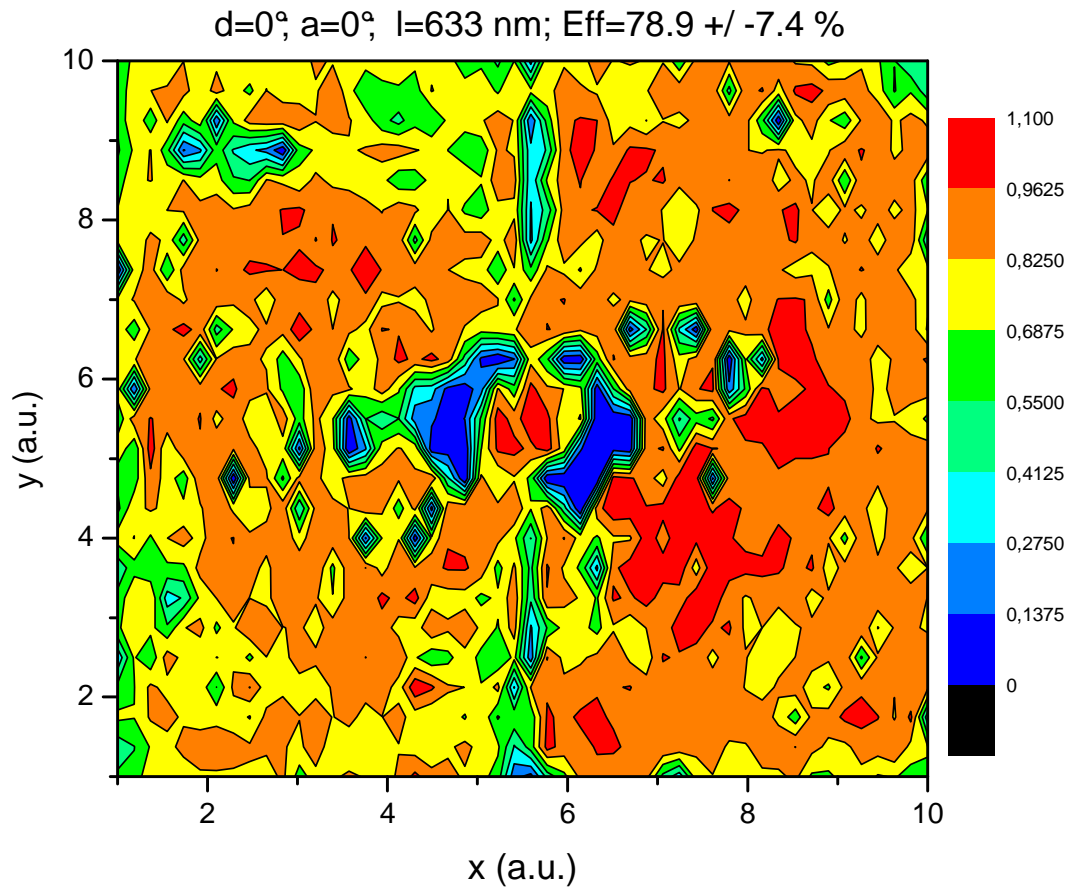


Figura 8

Successivamente si è provato un cambio di passo, portandolo a 4x4 mm, semplicemente escludendo parte dei dati presi (figura 6). Il paragone delle 2 mappe così costruite ha permesso di decidere di proseguire lo studio con il nuovo passo, ottenendo una notevole miglora sulla velocità di esame, calando i punti per misura da 1250 a 625, senza peggiorare la qualità delle mappe.

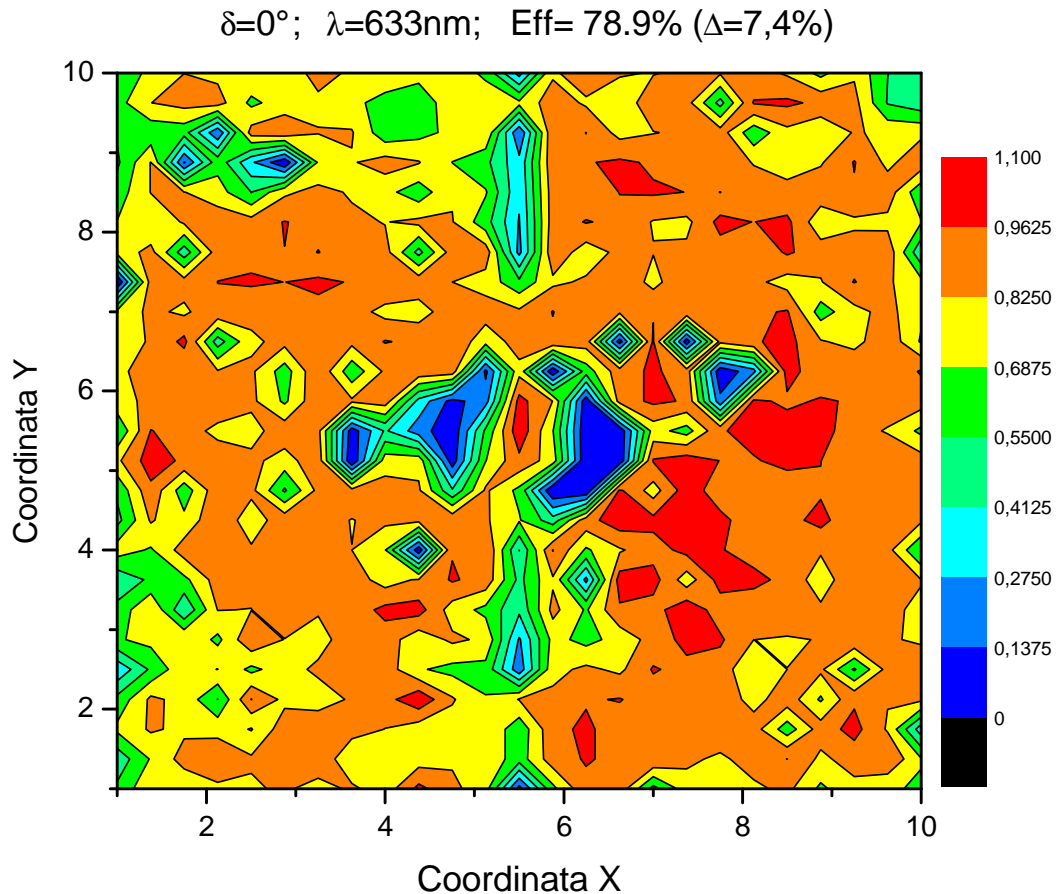


Figura 9

Le misure di cui sopra sono sensate solo assumendo che l'emissione del laser rimanga costante durante il processo.

Essendo tali misure basate su una procedura manuale i tempi per l'acquisizione sono piuttosto alti, per cui occorre studiare un modo per renderle il più attendibile possibile. Per permettere il confronto di misure effettuate in tempi diversi si effettuano tre calibrazioni, pennellando la cella direttamente, senza incidere sul CPC, con un passo di 0,5 mm per due volte. Temporalmente avvengono all'inizio, a metà ed al termine della serie di misure prese.

Con queste misure vengono rinormalizzati i valori numerici ottenuti, ma vengono usati solo i due valori che racchiudono la serie di misure, in modo da escludere il riscaldamento dell'apparato.

Quindi il primo ed il secondo valor medio andranno a pesare la prima metà della misura, mentre il secondo ed il terzo peseranno l'ultima parte.

In questa maniera ogni misura e mappa di efficienza portata è in percentuale (comprese le figure precedenti), dove il 100% è semplicemente il valor medio momentaneo della tensione generata dai raggi che raggiungono la cella senza riflessioni.

Per poter costruire la mappa con Origin gli assi x e y delle mappe non hanno una scala, avendo dovuto generare una matrice di dati. Ricordo comunque che quello che si vede è l'ingresso del CPC quindi con dimensioni 100x100 mm e valgono le proporzioni normali. A causa del modo scelto per normalizzare ci si può aspettare che certe zone del concentratore possano avere efficienza maggiore del 100%, effetto dovuto anche al fatto che la cella non era perfettamente uniforme nel generare corrente ma subiva piccole variazioni in base al punto di incidenza del raggio.

Per quello che riguarda la valutazione dei dati, già solamente valutando la figura 6 compaiono informazioni interessanti.

Innanzitutto se si divide l'oggetto in questione in due parti verticalmente in modo mediano rispetto all'asse x, come effettivamente è realmente composto, si nota che la parte destra ha un'efficienza maggiore.

Andando ad un controllo visivo dell'interno in effetti la parte sinistra presenta un numero più elevato di pieghe e di bolle dovute ad un'applicazione non perfetta del film 3M riflettente. Da questo si potrebbe pensare di applicare l'efficienza di destra come quella totale, scartando a priori quella di sinistra. La scelta non è però da considerare buona, questo tipo di estrapolazione è possibile solo con la misurazione a 0°, in seguito, variando l'angolo sarà impossibile identificare perfettamente quali raggi

vengono processati sono da una delle parti del concentratore. Questo porterebbe a valutazioni diverse con i passaggi futuri. Quindi come efficienza totale rimane quella di tutto l'oggetto, mentre comunque posso valutare quella della parte di destra come un'indicazione sulla massima efficienza raggiungibile con una deposizione accurata del film riflettente.

Numericamente l'intero oggetto processa costruttivamente il 78,9% dell'energia entrata, ma a destra la percentuale sale a ben 81,7%, mentre a sinistra è solamente del 76,2%.

Esiste una zona, ben visibile, dove i valori sono più bassi di quanto ci si potesse aspettare, è dove le due parti che costituiscono il concentratore sono in contatto. Questo effetto è plausibile per la difficoltà oggettiva in costruzione di evitare o un piccolo scalino o delle imperfezioni o semplicemente variazioni di spessore nella stesura del film.

Anche ai bordi esterni esiste un calo dell'efficienza, molto probabilmente non imputabile all'oggetto in sé. In quelle zone è infatti possibile, a causa della larghezza del beam del laser, che non tutto il raggio entrasse nel concentratore, pur non essendo visibile ad occhio nudo il riflesso sulle pareti. Questo porterebbe ovviamente ad una scansione di quelle zone ad energia minore, quindi, normalizzando con i valori comuni il risultato sarebbe quello di un abbassamento dell'efficienza non veritiero.

Un'informazione importante poi è nella parte centrale del CPC, quella dove ci si aspetterebbe un elevato valore di efficienza. Al contrario appaiono macchie scure che indicano valori estremamente bassi (in figura 7 si può vedere l'ingrandimento della zona menzionata), prossimi al 13%. Si nota una simmetria rispetto al centro di questo effetto, con ogni probabilità è dovuto ad un piccolo difetto nel processo di scavo che ha leggermente alterato l'inclinazione delle pareti rendendo così l'angolo non più ideale.

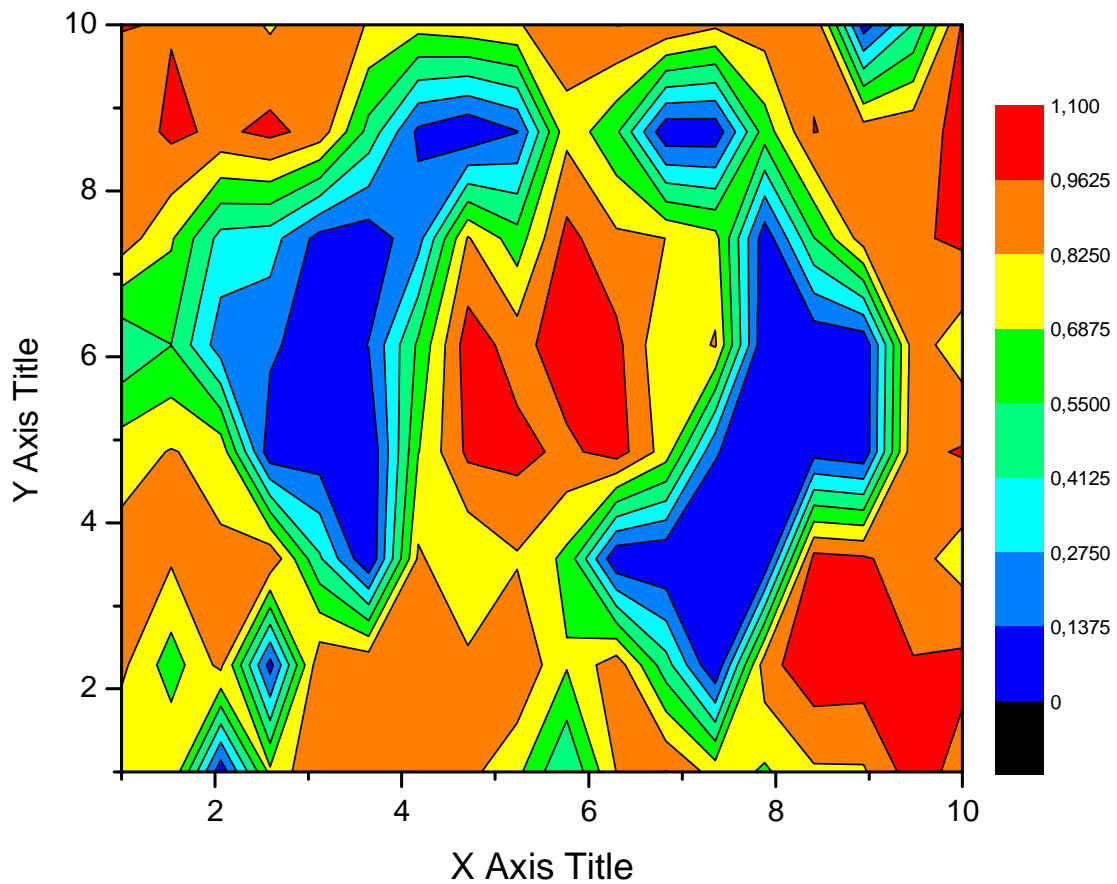


Figura 10

Da qui ci si aspetta quindi che in simulazione l'efficienza sia decisamente più alta, ma anche l'oggetto reale è effettivamente migliore rispetto a quello in studio.

La serie di misure successive sono finalizzate a determinare come l'efficienza di raccolta del sistema vari con l'angolo di incidenza dei raggi. Questa informazione permette di determinare l'accettanza ottica del sistema. Le misure, etichettate con il simbolo  $\vartheta$ , di  $0.5^\circ$ ,  $1^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$  e  $4^\circ$  corrispondono alle misure con inclinazioni del laser, nel piano orizzontale, corrispondenti



In figura 8 compaiono le medesime indicazioni fatte precedentemente, in più e interessante notare come il valore di efficienza non rimanga stabile passando dal 78,9% al 75,2%, i valori sono molto vicini, ma l'inclinazione del raggio è solo di  $0,5^\circ$ .

Si intravede poi che la parte sinistra del concentratore è quella che tende a perdere di più, questo è dovuto anche al fatto che la rotazione verso sinistra produce una variazione di angolo sfavorevole per le pareti a sinistra.

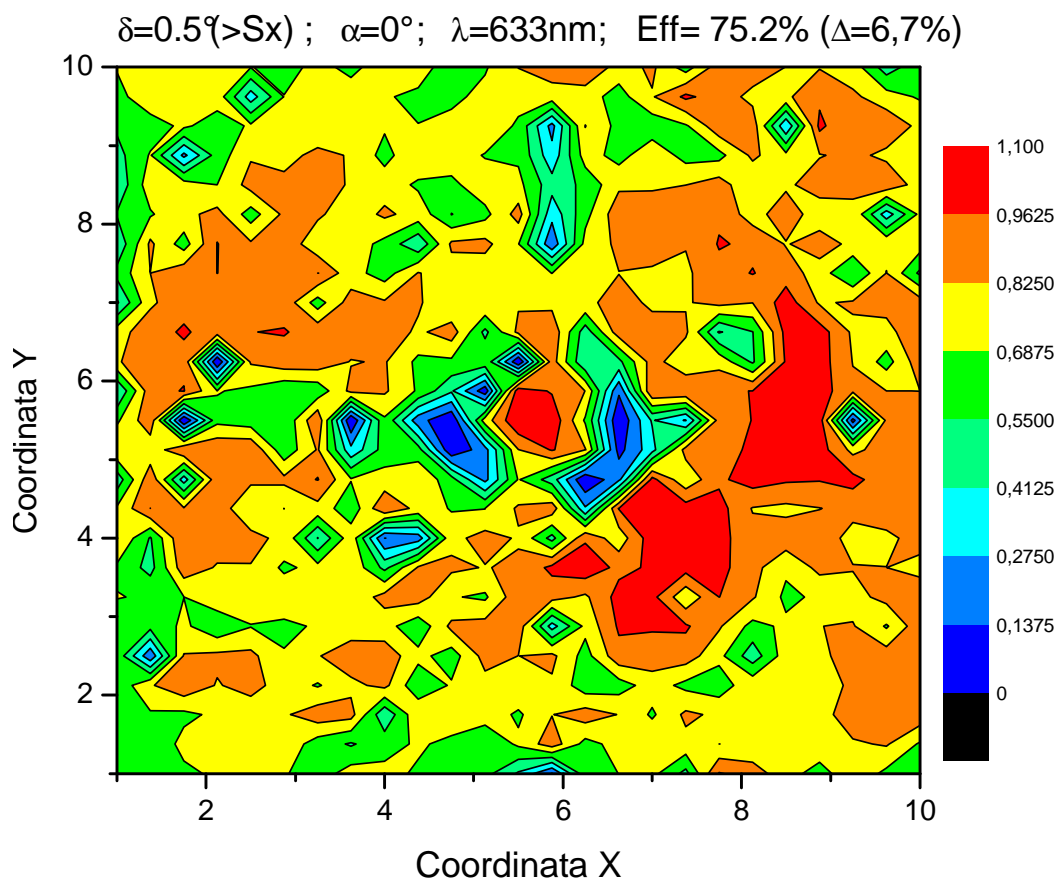


Figura 11

In figura 9 questo ultimo effetto appare facilmente visibile, soprattutto nella parte di bordo. Ora siamo passati al 73,4%, un valore ancora pienamente accettabile. Si notano ancora benissimo sia i difetti di costruzione che l'attaccatura delle due parti.

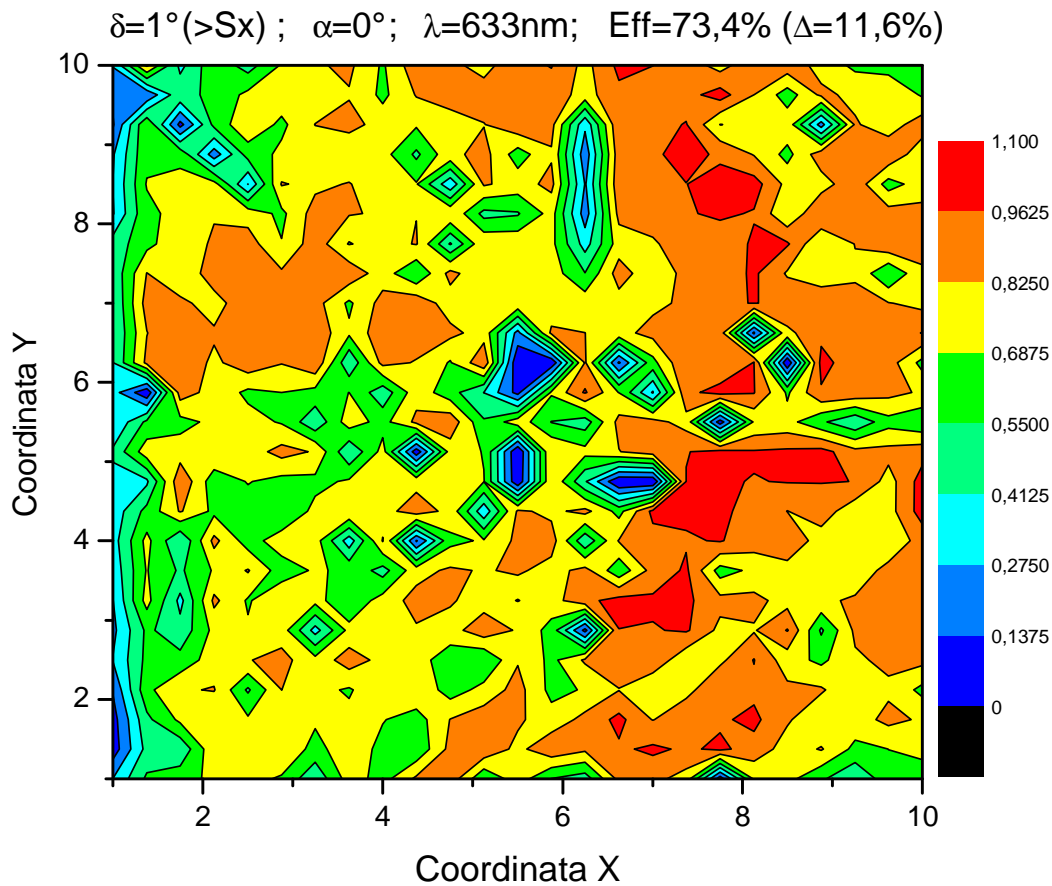


Figura 12

La figura 10, con un angolo di  $1,5^\circ$  dimostra come ci si stia avvicinando all'angolo limite, infatti il valore di efficienza si abbassa vistosamente raggiungendo il 63,9%. Ormai è solo la parte destra del concentratore a lavorare, mentre l'altra parte ha angoli troppo sfavorevoli, soprattutto nelle

parti esterne, dove non appaiono le pareti paraboliche ma dei piani, un caratteristica propria di questo CPC quadrato.

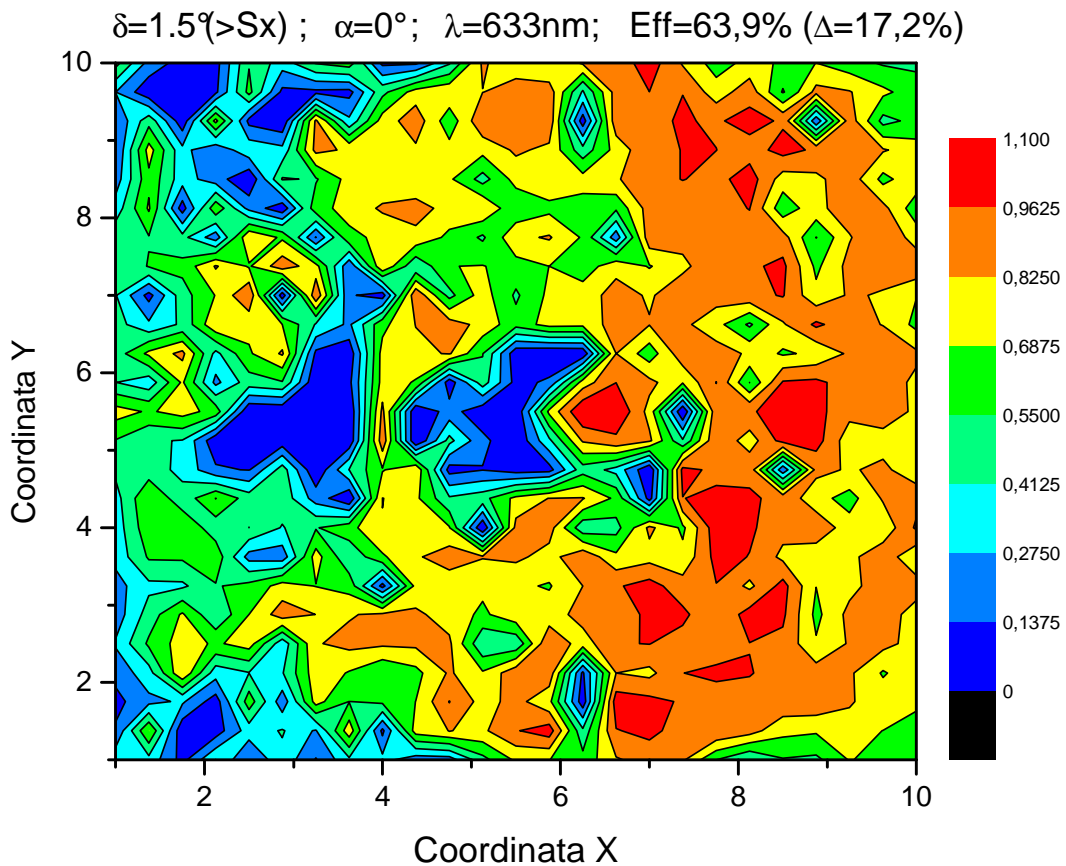


Figura 13

Successivamente, raggiungendo i  $2^\circ$  di inclinazione, ed un valore di  $56,4\%$  (figura 11), si può definire il CPC come un “interruttore di luce”. Infatti controllando questa mappa, e di conseguenza quelle successive, si capisce immediatamente che ad angolazioni verso sinistra la parte che lavora è quella destra, mentre l'altra ha angoli troppo sfavorevoli per ottenere risultati accettabili. Data la simmetria del concentratore però si può e deve supporre che cambiando il lato di inclinazione il CPC reagisca in modo del tutto analogo.

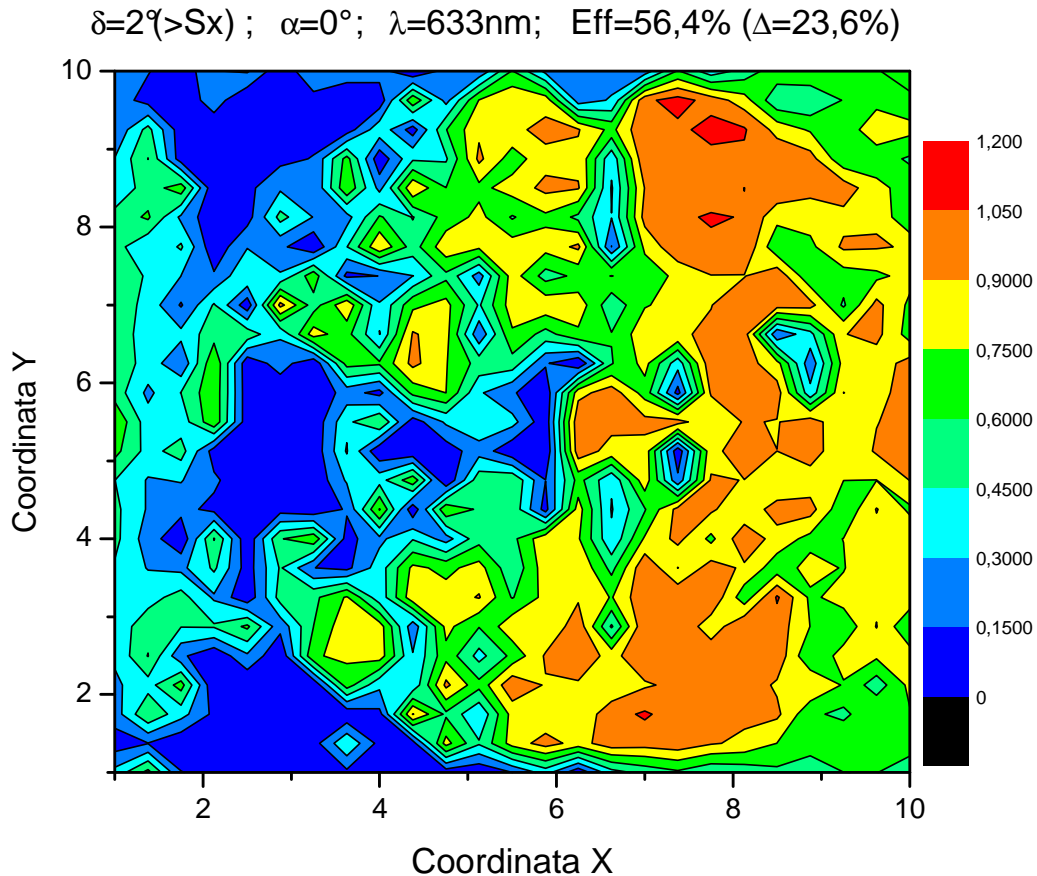


Figura 14

Quindi in queste condizioni appare possibile utilizzare il CPC non solo in situazione di concentrazione ma è teoricamente percorribile un uso come indicatore di inclinazione di un fascio, posto che abbia un angolo posto all'interno di quelli cui il concentratore è sensibile.

Con lo studio della successiva inclinazione (figura 12), quella a  $3^\circ$ , si individua immediatamente che è stato superato l'angolo limite dell'oggetto. Ora il valore di efficienza è al 35,4%. L'effetto di "interruttore di luce" è effettivamente molto marcato.

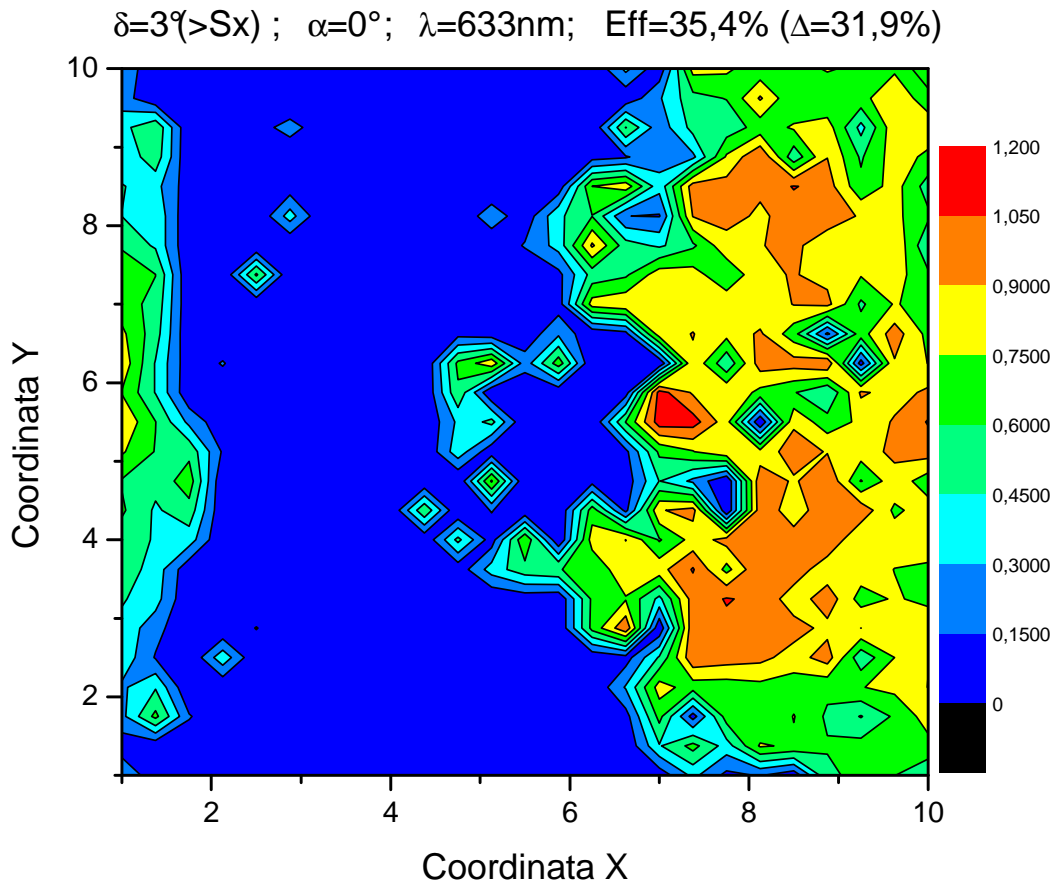


Figura 15

Al contrario è praticamente impossibile rintracciare le attaccature delle due parti e si può solo supporre la posizione del difetto vicino al foro di uscita. Interessante notare anche come ci sia stata un'inversione di tendenza nella parte sinistra del concentratore, ora la zona vicina al bordo verticale, quella quindi differente dai comuni CPC circolari, è quella di maggior efficienza. Con la misura a  $4^\circ$ , l'ultima presa, riportata in figura 13, si parla semplicemente della necessità di un valore a fine scala e per vedere quanto possa cambiare velocemente la situazione ad angoli abbastanza lontani da quello limite.

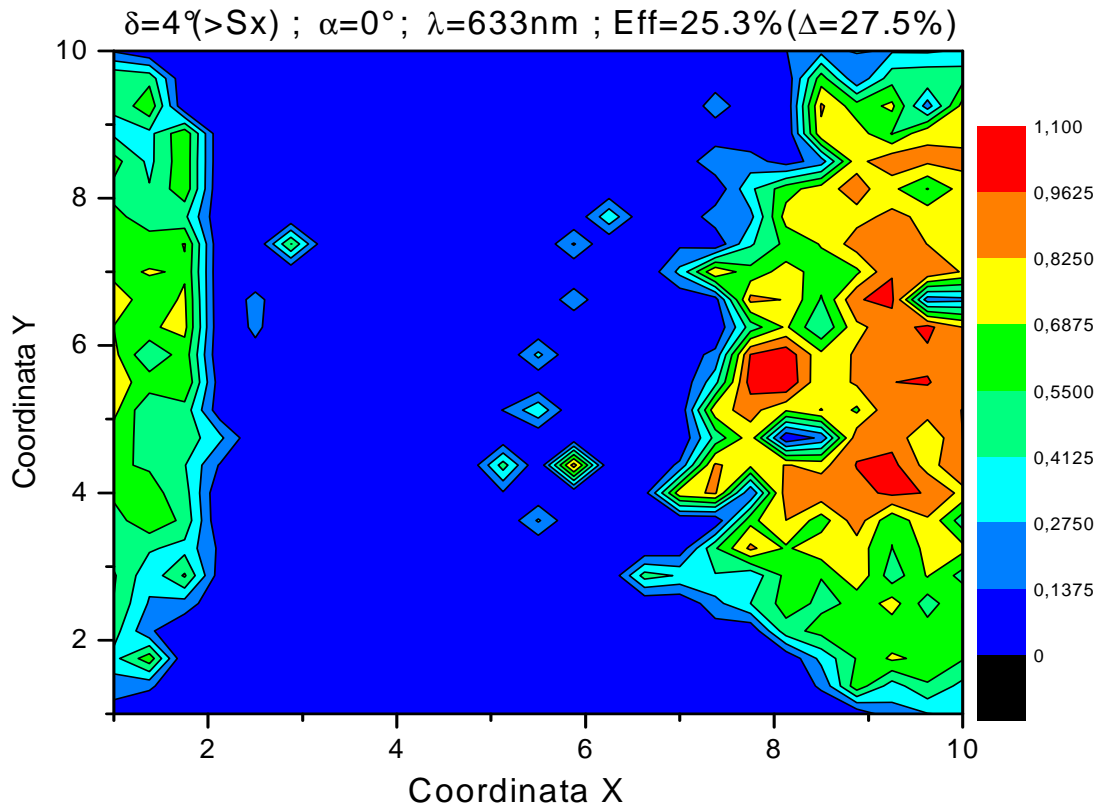


Figura 16

L'efficienza crolla al 25,3% e non è più possibile individuare le particolarità individuate con le prima misure. Permane un effetto di “interruttore” e continua il l'innalzamento dell'efficienza nelle zone di bordo. Notevole la vastità della zona centrale con valori di efficienza prossimi allo 0.

Dopo tutto questo è stato possibile metter in grafico l'efficienza in funzione dell'angolo d'ingresso, quindi uno studio per la ricerca dell'angolo limite dell'oggetto. Prendendo come ottimale i valori a  $\vartheta=0$ , e definendolo come un 100%, si possono vedere i risultati nel grafico in figura 14.

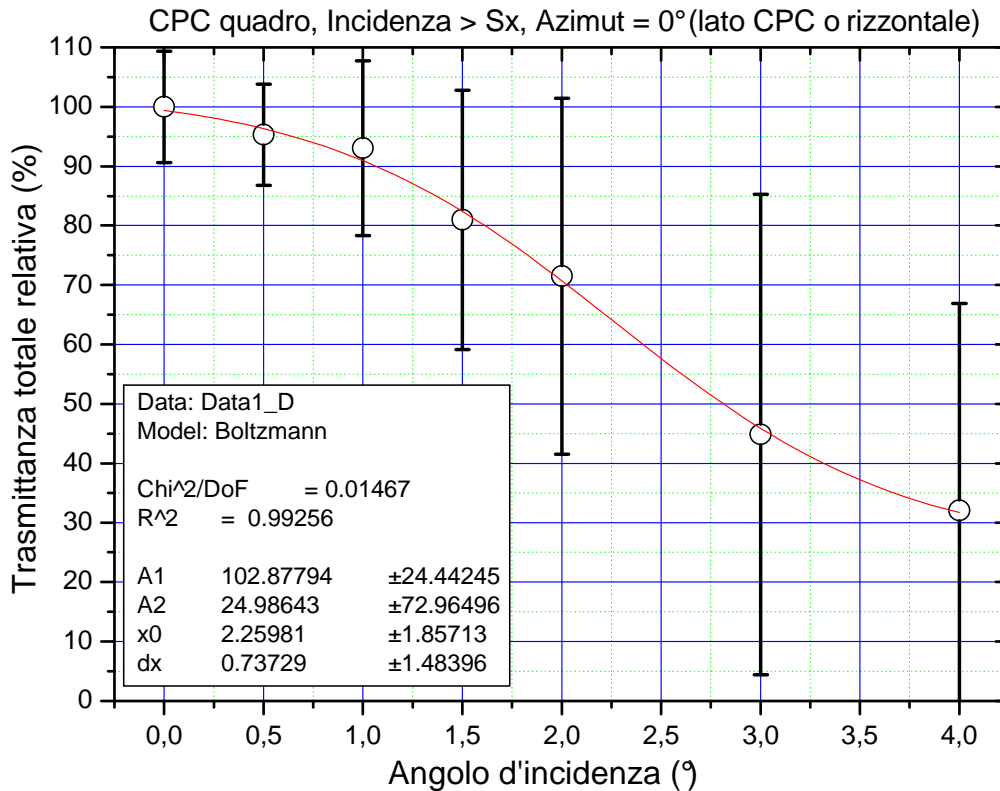


Figura 17

Dopo un'analisi grafica, posso definire come angolo limite, quello per cui ho un'efficienza del 50%, un  $\vartheta = 2,8^\circ$ .

In altro caso, andando ad ignorare la trasmittanza relativa, ma semplicemente risolvendo graficamente i dati con i valori assoluti, ottengo un  $\vartheta = 2,25^\circ$ . Di questo ometto il grafico, non portando novità sostanziali alla trattazione.

Viene poi ripetuto il lavoro fin qui svolto ma ruotando l'oggetto in studio di  $45^\circ$  rispetto al centro nella direzione della profondità. Questo angolo viene definito azimut.

A causa della rotazione ora la matrice di dati, per forza quadrata per motivi di comodità di uso del software, è  $35 \times 35$ , con una serie di zeri nelle posizioni

dove il raggio non entra nel concentratore. Per tutto il resto valgono le specifiche date precedentemente.

Ora quindi la visione della mappa produrrà un effetto di cornice azzurra di nessuna efficienza, nelle posizione messe in grafico ma da dove effettivamente nessun raggio entra nel concentratore.

Di nuovo, studiando la figura 15, con  $\vartheta=0$ , si nota ancora come la parte destra, ora ruotata in senso orario, sia più performante.

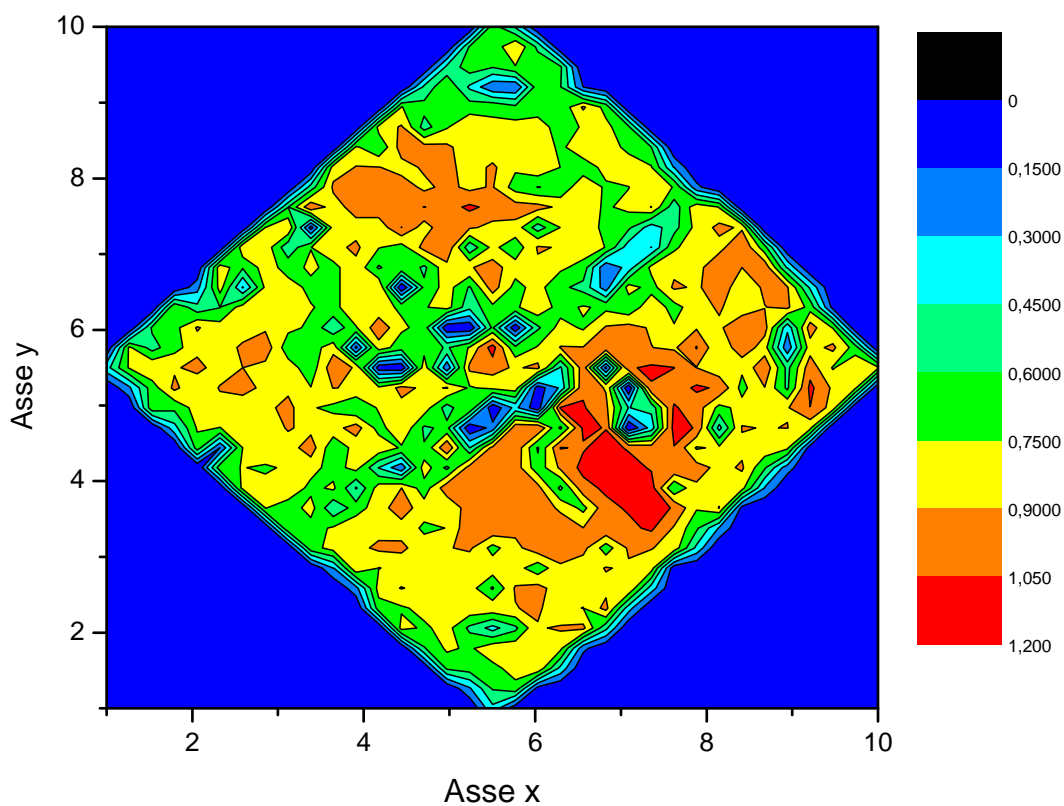


Figura 18

Rimangono ancora i cali dovuti al difetti di costruzione, di applicazione del film e dello scalino centrale dovuto all'attaccatura delle due metà. Ora il valore di efficienza è 75,8%.



Proseguendo lo studio con altri angoli poi è possibile ricercare anche in questa condizione l'angolo critico. In questo caso si sono fatte le mappe per  $\vartheta=1^\circ, 2^\circ, 3^\circ$  e  $4^\circ$ .

Ad  $1^\circ$ , in figura 16, non ci sono grosse differenze, ma inizia ad essere possibile un paragone con la serie di misure precedenti per riuscire a confermare l'effetto di "interruttore". Da notare anche come questo compaia prima in questa situazione. Ora si ottiene un valore di efficienza del 72,3%

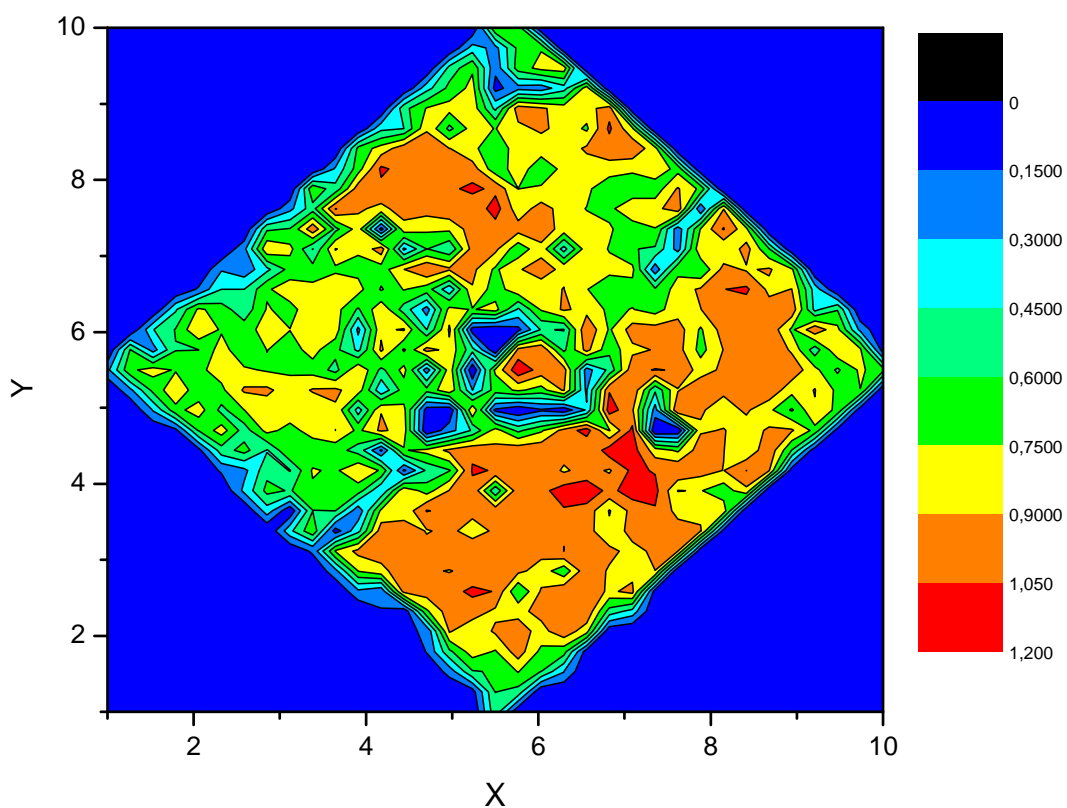


Figura 19

Già con un angolo a 2 gradi, visibile in figura 17, il fenomeno ad "interruttore" è assolutamente chiaro.

Nella parte con ancora valori apprezzabili si può notare ancora una delle attaccature e che la parte inferiore, che precedentemente era quella di destra, mantiene valori più alti.

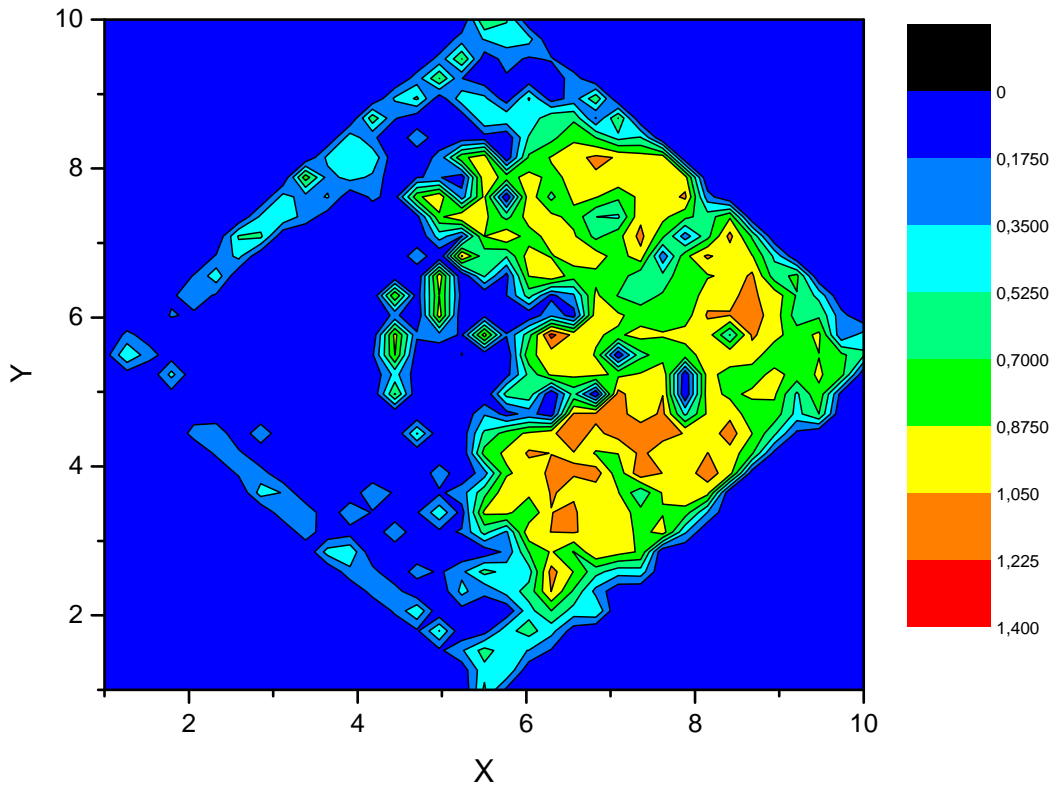


Figura 20

Lo studio delle mappe a 3° e 4° (fig 18 e 19) sono utili poi per individuare l'angolo limite in queste nuove situazione, che potrebbe essere diverso a quello trovato senza la rotazione, probabilmente più basso. Anche qui con il crollo dell'efficienza riappare l'effetto migliorativo del bordo.

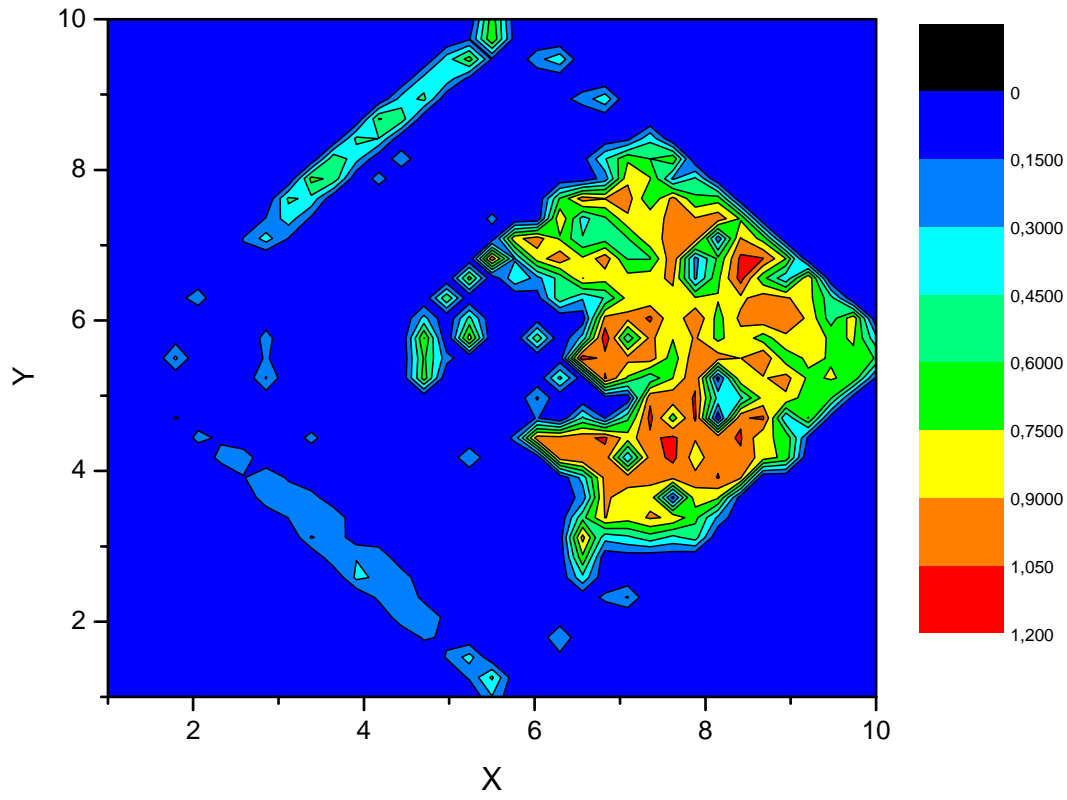


Figura 21

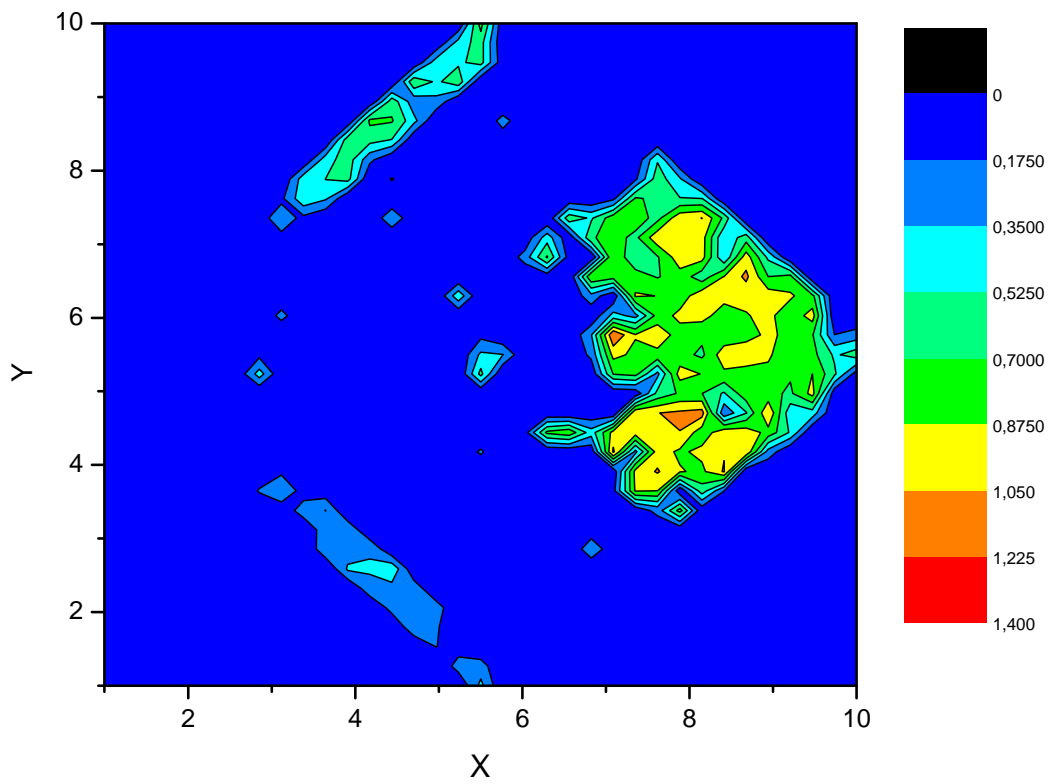


Figura 22

A questo punto è stato necessario costruire un grafico come nel caso precedente e specificare l'angolo limite tramite la sua analisi.

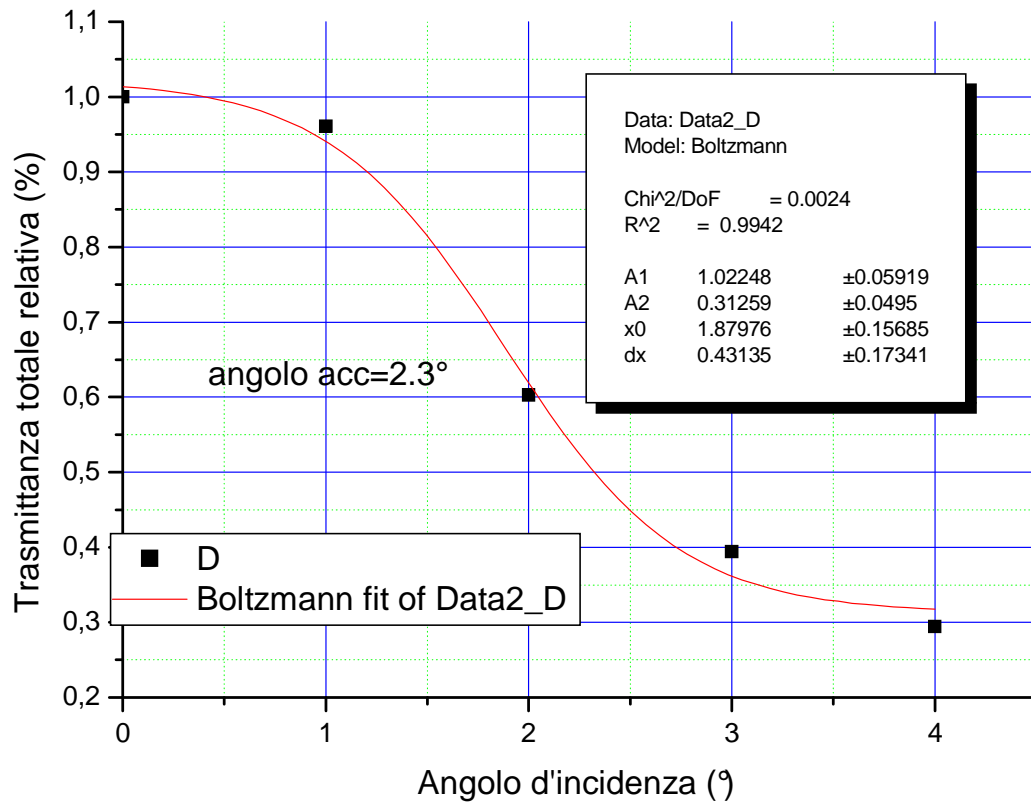


Figura 23

Come studiato precedentemente ottengo altri due angoli, uno, relativo, di 2,3°. Mentre quello assoluto è di 1,8°. Andando a valutarli con quelli precedentemente presi con un angolo azimutale di 0° posso affermare che in questa situazione il concentratore appare decisamente più sensibile all'inclinazione dei raggi incidenti e meno efficiente.

### 2.3 Analisi angolare del fascio concentrato

La seconda parte del lavoro in laboratorio era rivolta allo studio dell'escursione degli angoli di uscita dei singoli raggi del fascio concentrato, sempre in rapporto alla posizione di ingresso. Per questo si è escluso il rivelatore all'uscita del CPC e non è stato necessario l'uso del software prima menzionato di LabView. E' stato necessario l'uso di un laser Melles Griot verde, con potenza di 5mW e lunghezza d'onda di 543,5 nm e di una semisfera posizionata all'uscita del concentratore, su cui sono stati disegnati meridiani e paralleli per una migliore definizione. Si valutano due angoli, quello rispetto all'asse z, definito zenitale, variabile tra gli  $0^\circ$  ed i  $90^\circ$ , e quello azimutale, necessario per definire univocamente la posizione del punto sulla semisfera, compreso tra  $0^\circ$  e  $360^\circ$ .

In figura 21 appare una ricostruzione fatta in TracePro del set-up, con l'aggiunta degli assi, in modo da chiarire meglio quanto appena scritto.

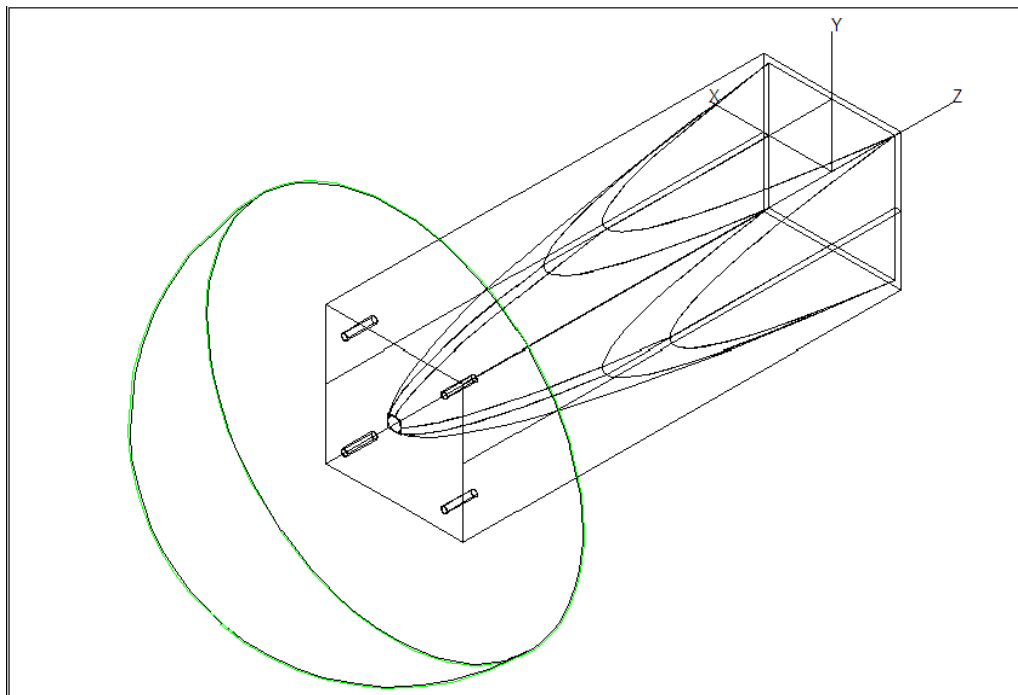


Figura 24

Anche in questo caso il modo di studio è quello di scandagliare la superficie del concentratore. Per motivi di comodità e di chiarezza mantengo fissi tutti parametri comuni allo studio precedente, come il passo delle misure. Al termine del lavoro si possono studiare le due mappe angolari, sempre prese in funzione della posizione d'ingresso del fascio.

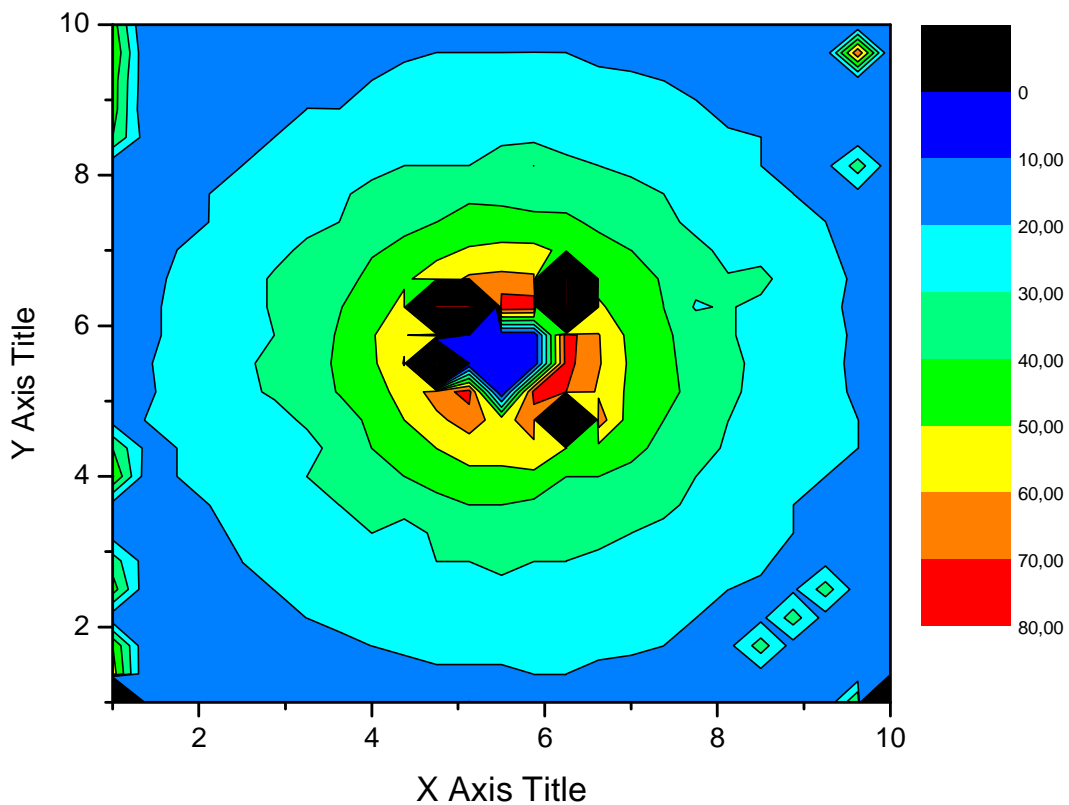


Figura 25

Si nota chiaramente in figura 22, come l'angolo zenitale, avvicinandosi al centro dell'oggetto, e quindi aumentando la ripidità delle pareti, risulti essere via via maggiore, come si poteva supporre. Molto vicino all'apertura, dove si era trovato il crollo dell'efficienza, ora ci sono delle macchie nere, per mancanza di dati da valutare. Le incongruenze dal chiaro schema concentrico, se si controlla la mappa in fig. 6, sono dovute a difetti macroscopici del film, come bolle o pieghe, e corrispondono a punti poco

efficienti del concentratore. In prossimità del foro di uscita poi ci sono angoli prossimi agli  $80^\circ$ , ma non maggiori, mentre teoricamente ci si aspetterebbe la presenza di angoli vicini ai  $90^\circ$ . Questa mancanza potrebbe essere dovuta al fatto che a livello teorico i raggi così inclinati dovrebbero essere statisticamente pochi. In più la costruzione di un oggetto porta sempre a differenze rispetto alla teoria, infatti nel disegno la parte del foro di uscita risulterebbe ai bordi come un film sottilissimo mentre in costruzione appare inevitabile una smussatura, soprattutto quando gli spessori sono molto piccoli. Per questi due motivi è quindi ammissibile il fatto di non riscontrare inclinazioni così forti.

In figura 23 si nota come la misura confermi assolutamente il fatto che il raggio incidente, se perfettamente perpendicolare all'ingresso raggiunge il foro d'uscita dopo una sola riflessione, infatti esiste una simmetria centrata sul punto d'uscita tra fascio entrante e uscente. E' anche notevole la linearità del processo. Questo è l'angolo azimutale.

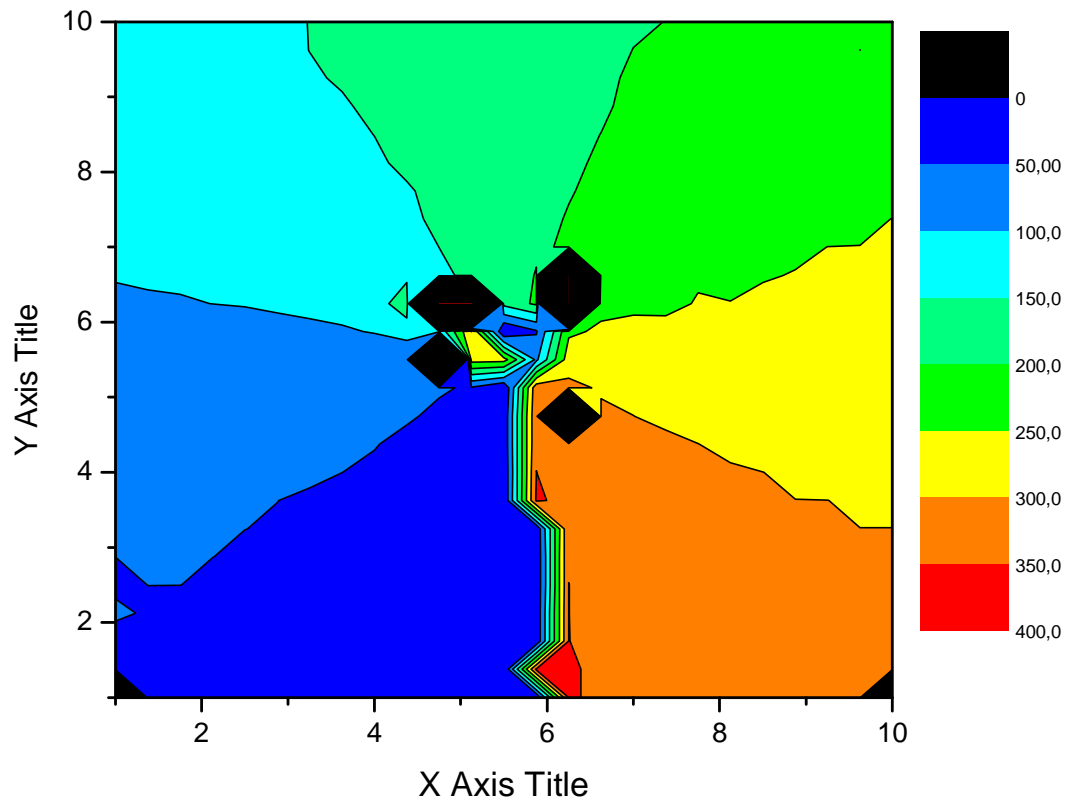


Figura 26



## CAPITOLO 3

### **3.1 Simulazioni per la stima dell'efficienza**

Al fine di completare la caratterizzazione e per verificare se effettivamente il lavoro di laboratorio sia stato efficace sono state effettuate alcune simulazioni ottiche tramite il programma TracePro.

Inizialmente è stata ripresa la trattazione riguardante l'efficienza, in modo da paragonare dati ideali con quelli reali.

A tal proposito, nel programma viene costruito un assorbitore ideale cilindrico all'uscita del concentratore, con un diametro identico al foro di uscita. Le superfici riflettenti sono semplificate da uno specchio con una riflettività di quasi il 95%. Viene poi creata una griglia di emettitori, che simulano varie posizioni del laser simultaneamente, grande quanto l'apertura del CPC, che emette una serie di 100 x 100 raggi. Viene eseguita poi la mappa di assorbimento sulla superficie del cilindro a contatto con l'uscita dell'assorbitore. Il lavoro viene ripetuto per tutte le angolazioni prese in esame in laboratorio.

Ci sono alcune diversità tra questa simulazione ed il laboratorio.

La quantità di raggi nella griglia è decisamente maggiore qui, il tempo di elaborazione per una griglia da 100x100 raggi è accettabile e il dettaglio non può che essere migliorato rispetto a quello della 25x25 reale.

Lo studio è rivolto a due controlli diversi, mentre rimane come obiettivo primario la ricerca dell'efficienza e lo studio dell'angolo limite.

Prima si schematizzava tutto in funzione della posizione d'ingresso, utile anche per migliorare l'oggetto realmente in funzione o verificare alcune

particolarità inattese, ora viene fatta una mappa di assorbimento all'uscita, perdendo ogni informazione su dove è partito il segnale.

Per rendere più chiare l'immagine esplicativa in figura 1, la zona rossa è il fascio che nasce dalla griglia, mentre l'assorbitore, che ha dimensioni piccole relativamente agli altri oggetti è verde.

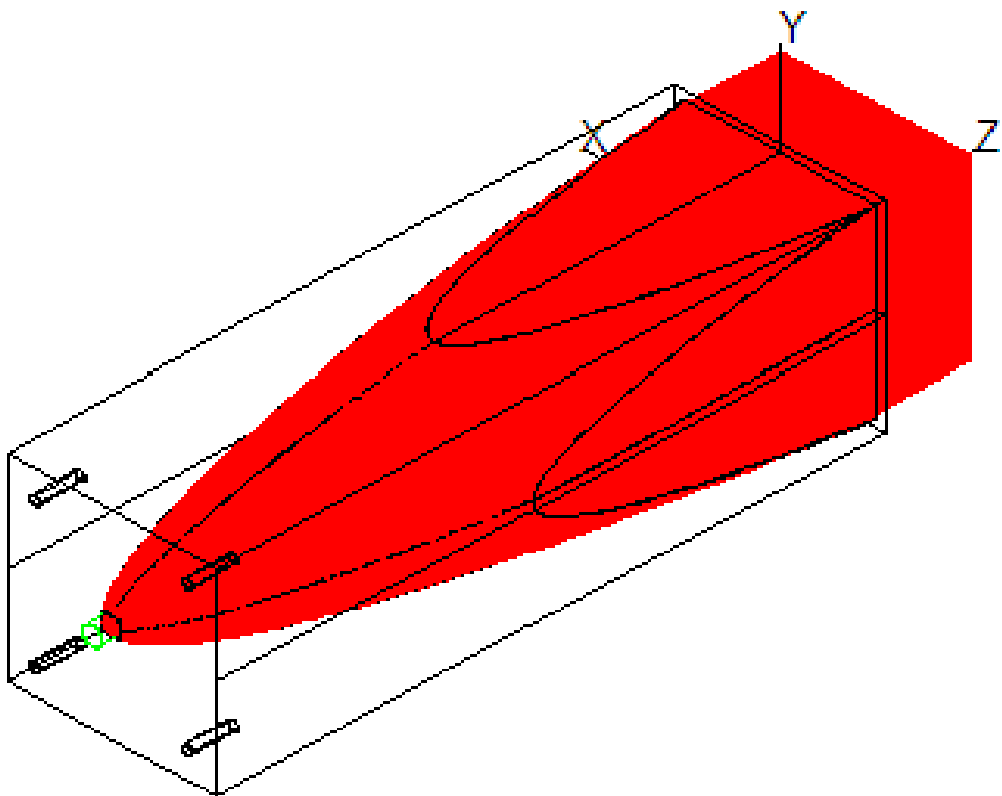


Figura 27

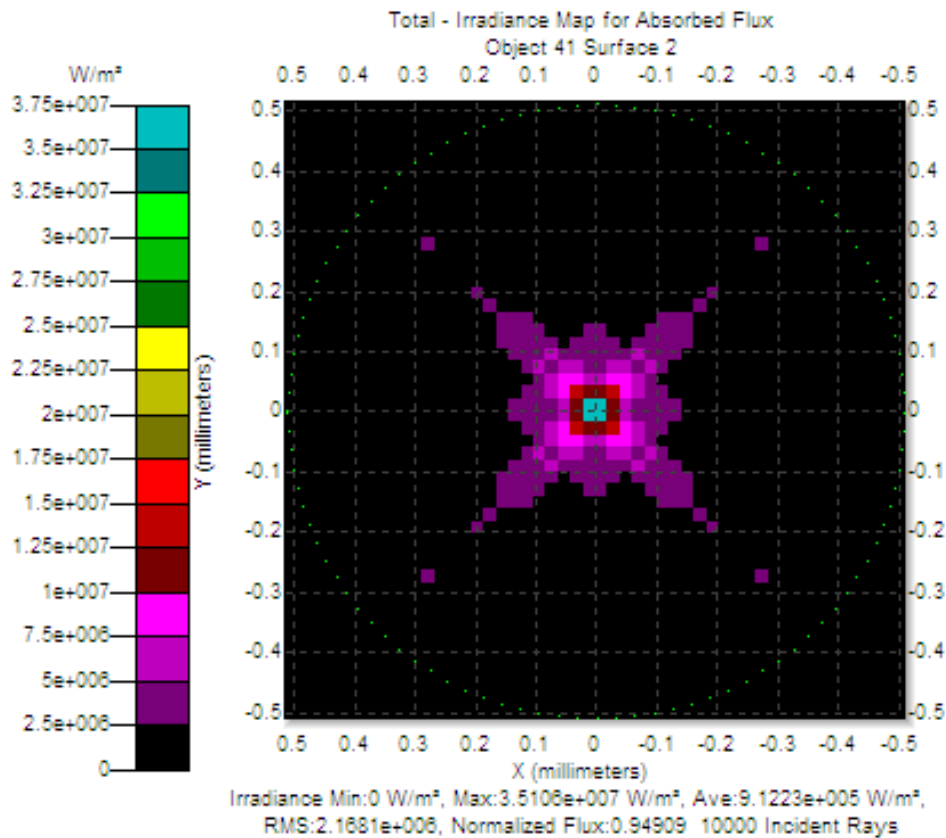


Figura 28

La prima valutazione, utilizzando come prima, solamente la situazione a  $\vartheta=0^\circ$  (fig.1) e la relativa mappa (fig. 2), porta immediatamente alla luce che il CPC è stato studiato per funzionare al massimo delle sue possibilità, quindi con una sola riflessione, in caso di raggio incidente perfettamente perpendicolare. Infatti nella mappa di assorbimento viene confermato che tutti i raggi raggiungono l'uscita e l'energia totale assorbita è del 95% circa, possibile solo se all'interno del concentratore tutte le componenti del fascio subiscono un'unica riflessione.

Sempre osservando la mappa di assorbimento, si nota come la maggior parte del fascio venga concentrata al centro, le quattro diagonali sono da imputare alla forma del concentratore, non dovrebbero essere presenti nei CPC circolari.

Con la simulazione successiva a  $0,5^\circ$  (fig. 3 e 4) si mantiene stabile il numero di raggi incidenti e l'energia catturata dall'assorbitore, ma la figura di riflettanza appare decisamente cambiata. Da ora in poi, inclinando i raggi, sono obbligato a inserire la griglia generatrice all'imboccatura del concentratore, quindi, quando nelle immagini di simulazione si vedranno dei raggi all'esterno del CPC saranno quelli che, dopo riflessioni multiple, verranno espulsi e non portati all'uscita.

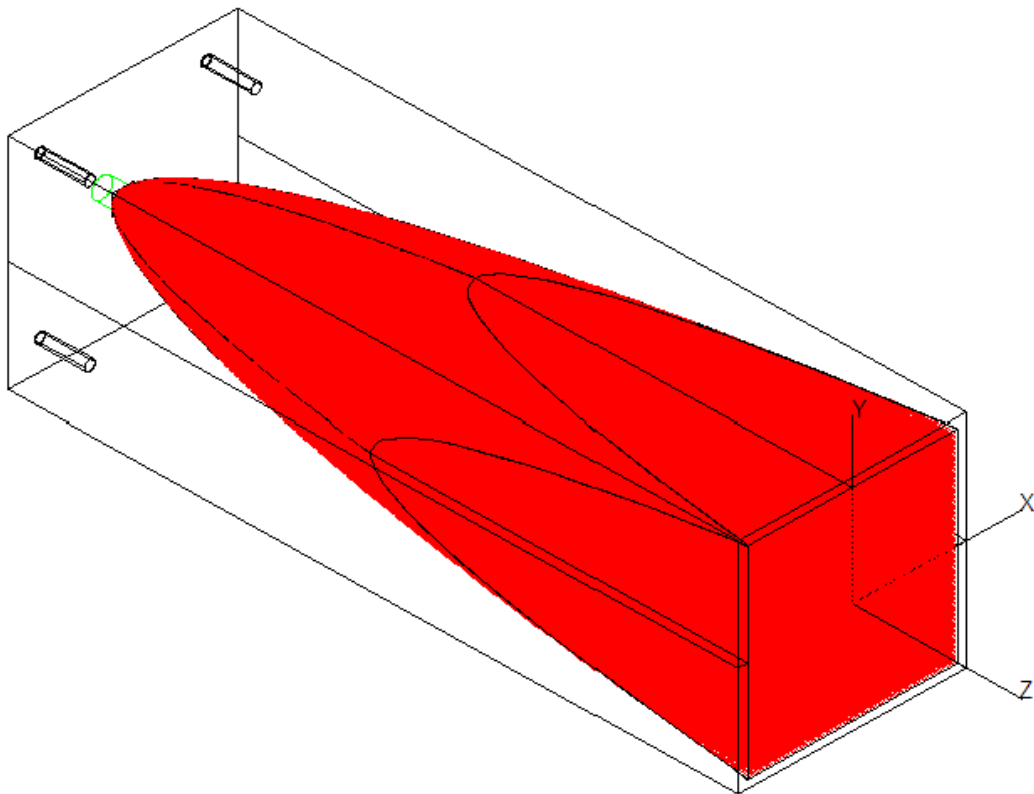


Figura 29

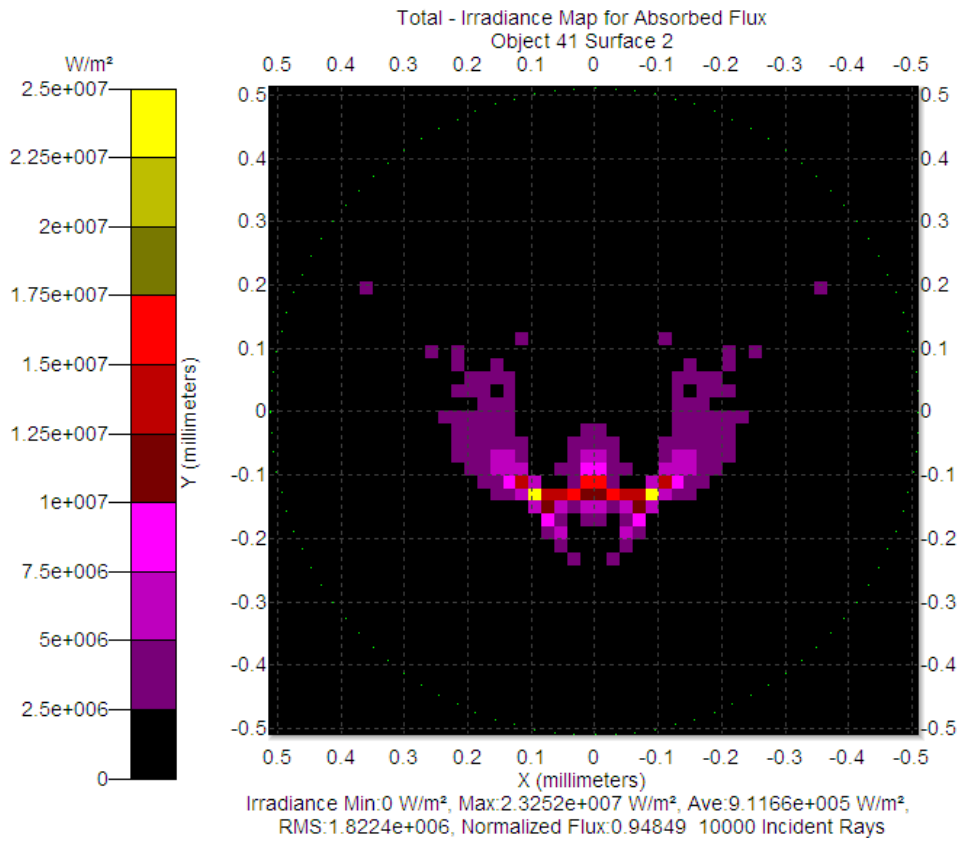


Figura 30

Lo stesso si può riassumere con lo studio della mappa con  $\vartheta=1^\circ$ , ( figura 5) dove l'efficienza è al 94.7%, rispetto al 94.9% precedente, quindi iniziano gli effetti di riflessione multiple interne al concentratore, ma in misura assolutamente minima.

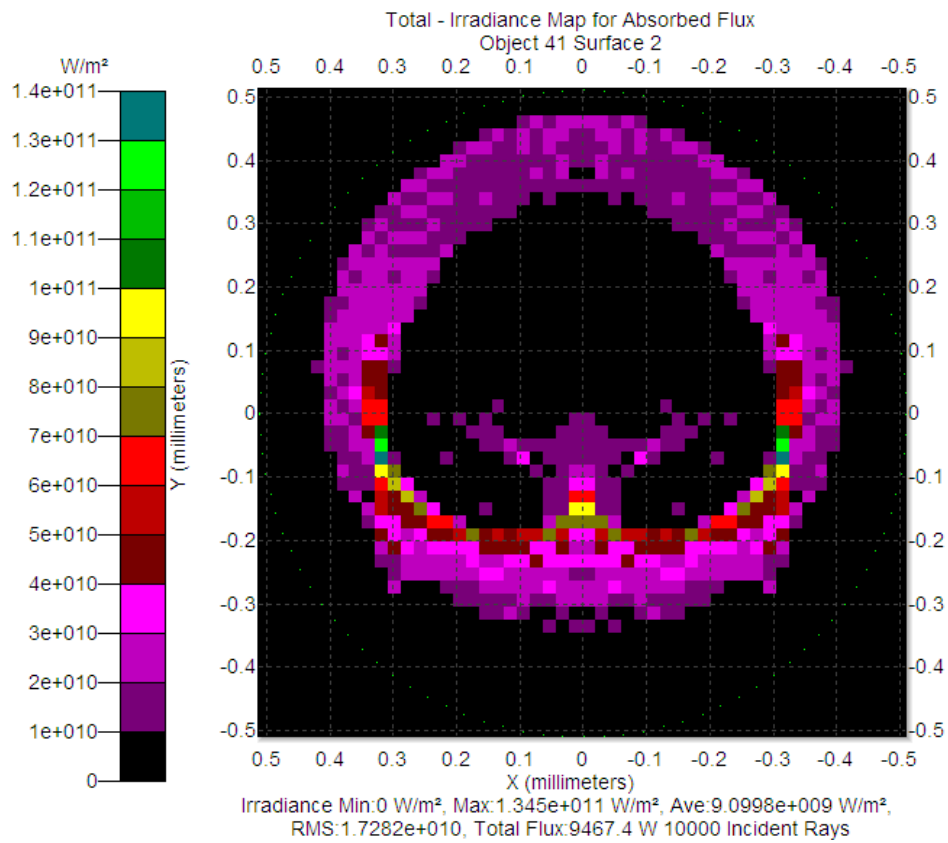


Figura 31

Un calo di efficienza del sistema inizia ad avvertirsi solo successivamente. A tal proposito in figura 6 e 7 appare la situazione con l'inclinazione a  $1,5^\circ$ .

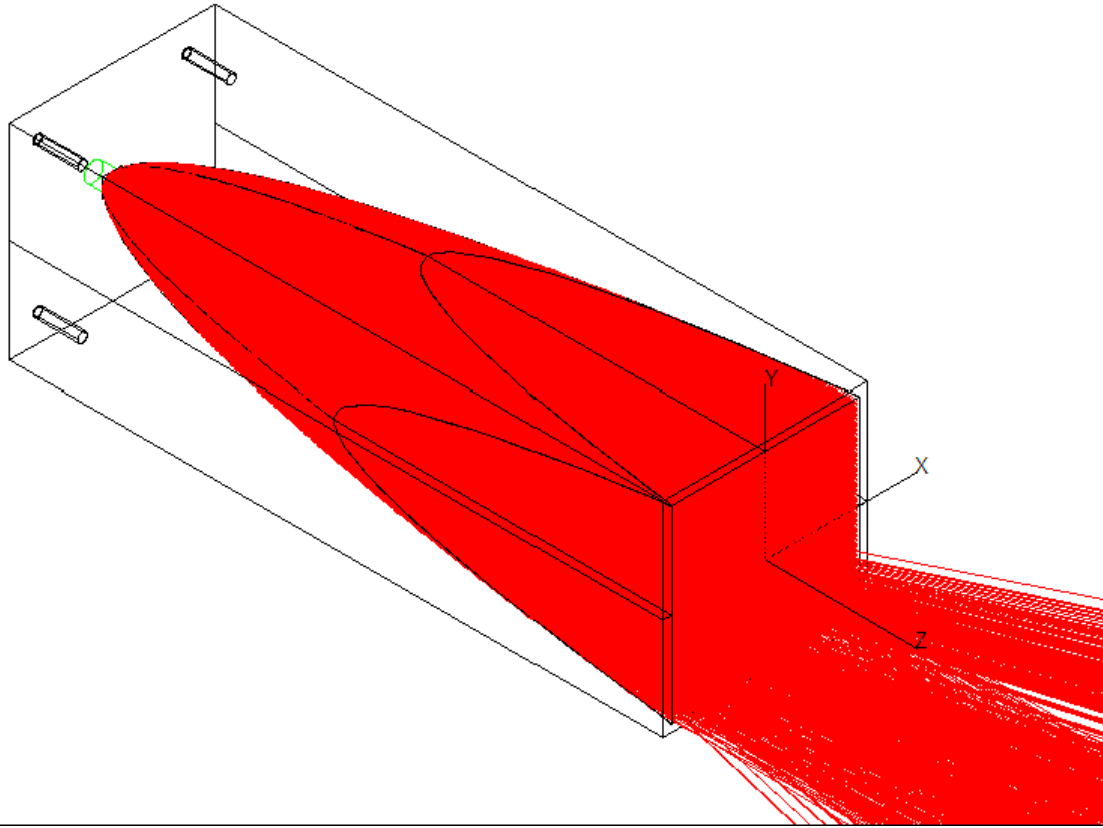


Figura 32

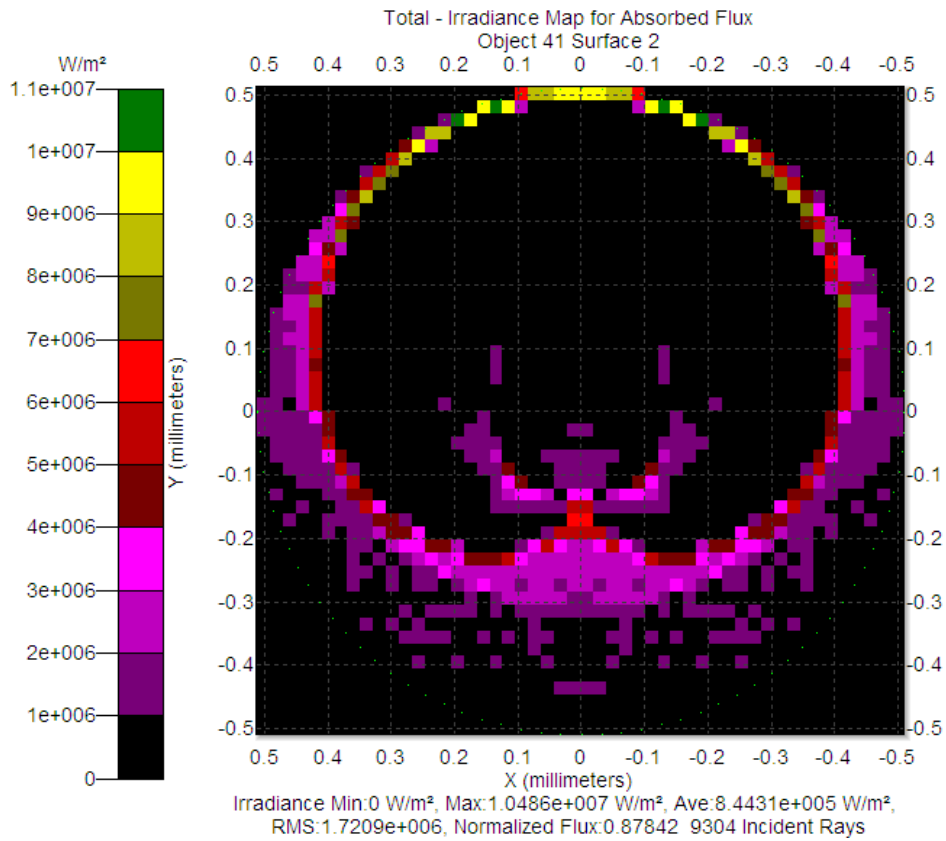


Figura 33

Qui si passa immediatamente a 9304 raggi su 10000 assorbiti con un recupero dell'energia emessa che cala al 57,9%, quindi oltre ai raggi persi ci sono anche numerose riflessioni all'interno del concentratore anche per quelli che vengono assorbiti.

Con l'analisi successiva a 2°, in figura 8, si passa al 52.7%, come si poteva supporre dai dati di laboratorio è un valore prossimo all'angolo limite.



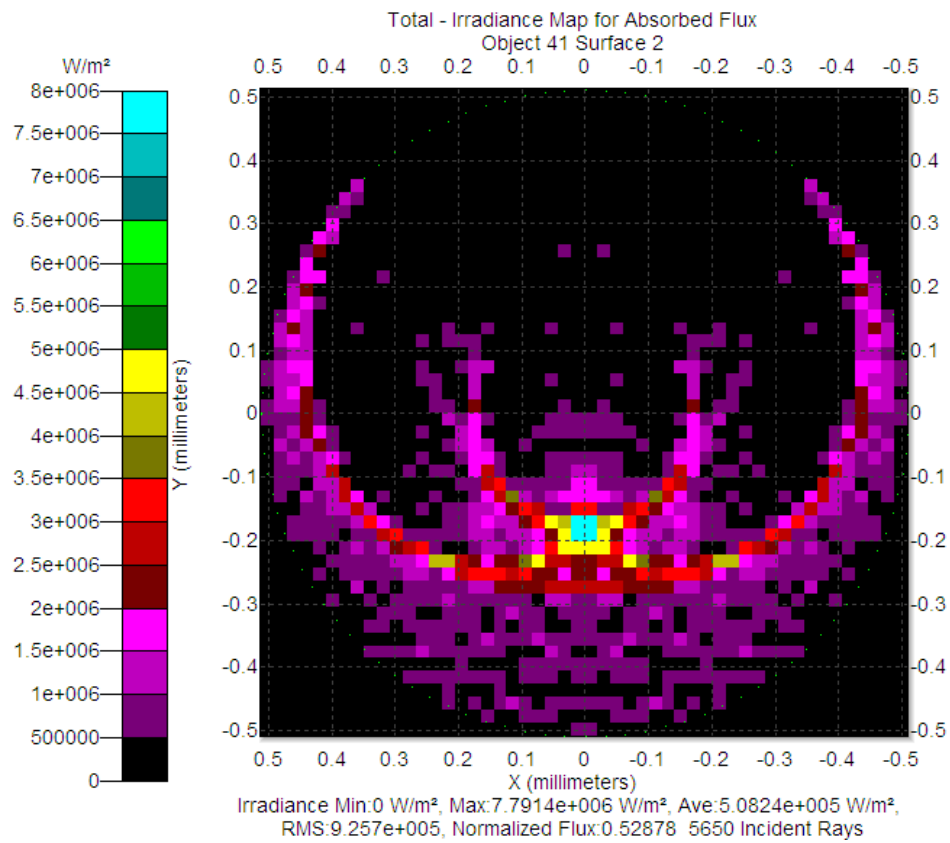


Figura 34

Per poi arrivare al 38,8% con l'analisi a 3° in figura 9, qui è chiaro che si è andati ben oltre l'angolo limite teorico.

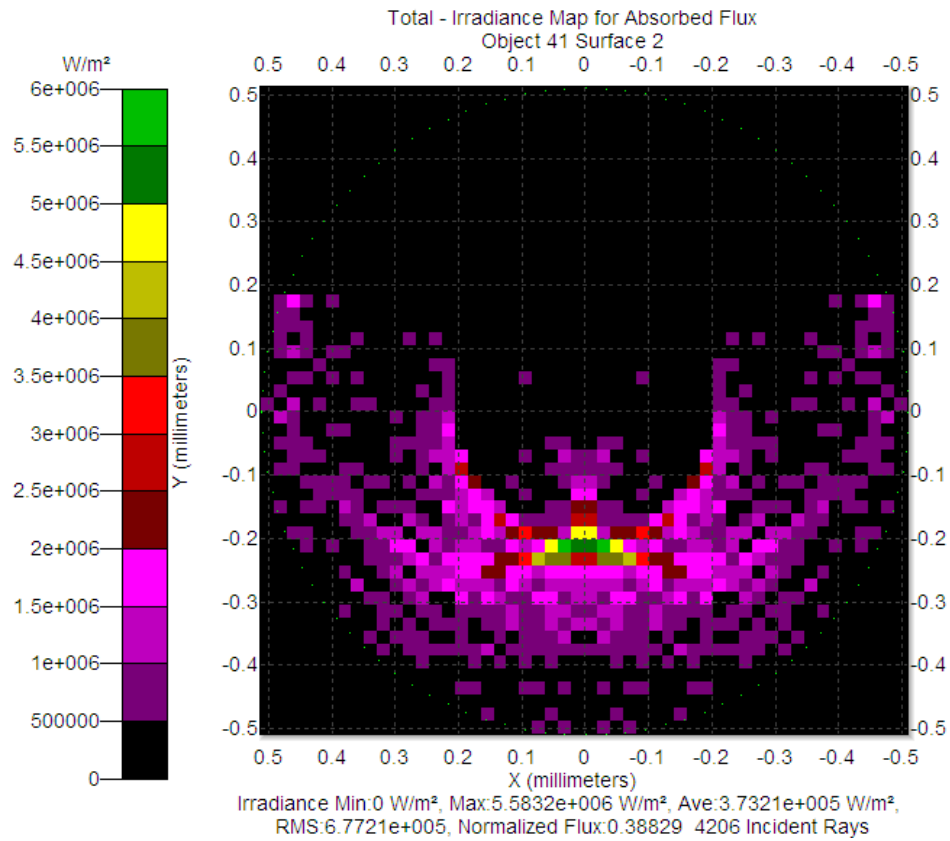


Figura 35

Infine, con  $\vartheta=4^\circ$ , arrivo ad un valore di efficienza del 31,2% (figura 10), anche in questo caso quindi, la misurazione con un angolo di incidenza di  $4^\circ$  ha uno scopo esclusivamente scolastico. E' un punto limite ma comunque un fattore in più che aiuta la costruzione della curva di efficienza.

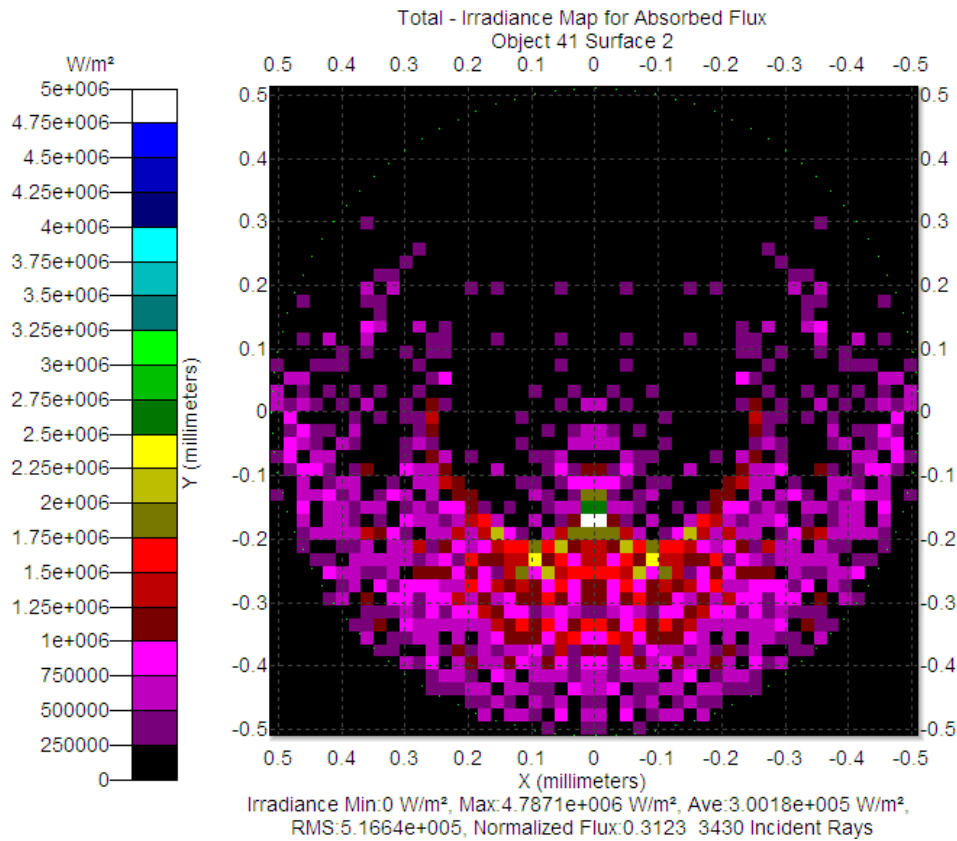


Figura 36

Visualizzando il lavoro completato si dimostra che, nonostante l'efficienza reale dell'oggetto sia decisamente minore di quella trovata nelle simulazioni, la ricerca dell'angolo limite dia risultati del tutto simili e anche la curva ha andamento similare. In figura 11 si possono valutare gli andamenti di quelle assolute, non valutate precedentemente. Appare lo stesso andamento, con un andamento teorico molto più brutale nei passaggi da alta a bassa efficienza. Valutando però a quale angolo le due curve raggiungono il 50% si ottengono valori distanti meno di un quarto di grado.

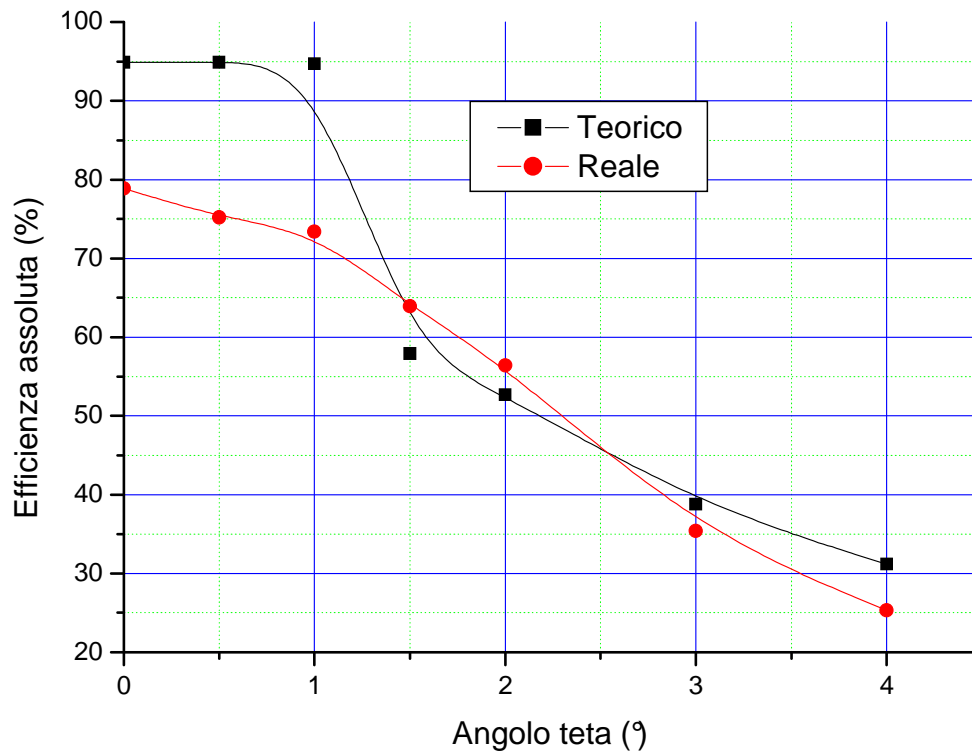


Figura 37

Avendo ultimato questo tipo di misure si può valutare una tabella riassuntiva dei valori

In tabella 1 si sono elencati i dati utilizzati per il grafico, per teorico si intendono i valori ottenuti con le simulazioni.

ANGOLO $\vartheta$ (°)	REALE (%)	TEORICO (%)
0	78,9	94,9
0 solo dx	81,7	94,9
0,5	75,2	94,9
1	73,4	94,7
1,5	63,9	57,9
2	56,4	52,7
3	35,4	38,8
4	25,3	31,2

### 3.2 Simulazione per l'analisi dell'angolo di uscita del segnale

Si è poi passato ad una singola simulazione per valutare l'angolo di uscita dei vari raggi. Si è impostato il problema in modo che potesse essere il più simile possibile alla situazione di laboratorio, quindi la griglia generatrice ha le stesse impostazioni di prima, con un angolo  $\vartheta$  a  $0^\circ$ . E' stato ovviamente rimosso l'assorbitore perfetto, mentre è stata creata una superficie perfettamente assorbente emisferica, visibile in verde, dietro il concentratore che simula la semisfera usata realmente.

Anche questa volta non è stato possibile fare uno studio in funzione della posizione d'ingresso, ma ci si limita semplicemente ad uno studio prettamente angolare.

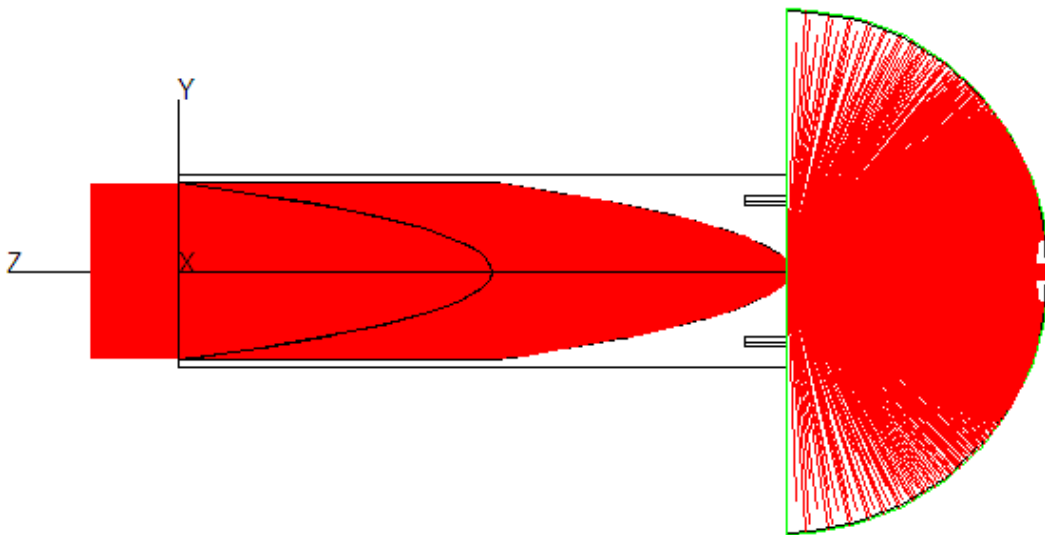
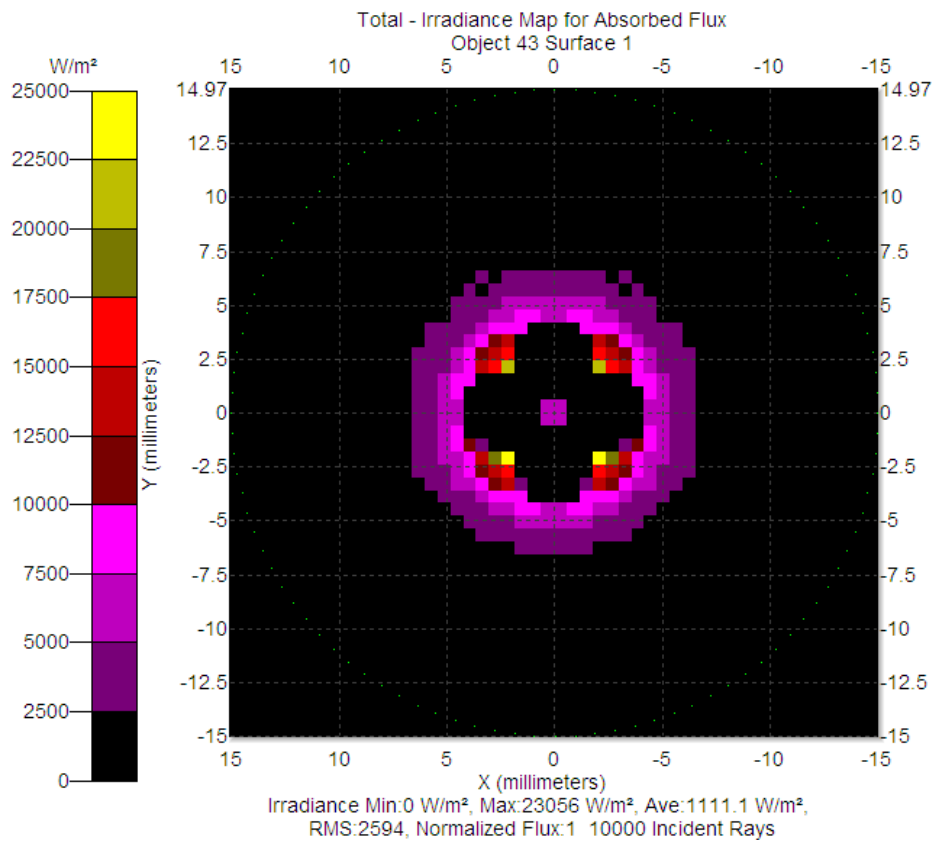


Figura 38

Per poi valutare i vari angoli sono state fatte le mappe di assorbimento.



**Figura 39**

Il punto centrale è dovuto a quei raggi che passano direttamente all'esterno attraversando il concentratore senza esserne influenzati, quindi senza nessuna riflessione.

Simulando nuovamente l'esperimento, ma questa volta rimpicciolendo la semisfera, che a questo punto diventa una calotta sferica, in modo da catturare solo raggi deviati con un angolo zenitale di  $20^\circ$ , si nota che in questo angolo ci sono ben il 41% di raggi, mentre con inclinazione superiore a  $80^\circ$  si possono trovare solamente 68 raggi, lo 0,68% del fascio totale. Dato quest'ultimo valore appare ancora più plausibile la mancanza di rilevazioni di tali inclinazioni nelle prove reali.

## CONCLUSIONI

Una volta giunti al termine del lavoro è assolutamente necessario fare una valutazione sulla bontà dell'idea di come caratterizzare un concentratore o meno.

Prima di tutto lo sforzo era quello di ottenere un metodo facilmente eseguibile e che permettesse il calcolo di efficienza e la ricerca dell'angolo limite.

In effetti il metodo è semplice da eseguire e, nonostante sia stato rivolto all'ottica non-imaging, è riproducibile senza stravolgimenti anche per la valutazione di parabole o altri tipi di concentratori.

La particolarità però che rende questo un buon modo per affrontare questa questione è la grande quantità di informazioni aggiuntive che riesce a fornire. Il lavoro in laboratorio, improntato soprattutto sullo studio del comportamento del concentratore rispetto la posizione di incidenza del raggio, permette una valutazione locale di efficienza e come conseguenza più immediata fornisce informazioni su dove è possibile lavorare per rendere ancora più efficiente l'oggetto in studio.

In più il fatto della scoperta del funzionamento del tipo "interruttore", assolutamente non utile allo scopo del fotovoltaico, dimostra che questa metodologia permette di rilevare comportamenti particolari, magari utilizzabili in altri ambiti.

Con la simulazione poi si è in grado di capire quanto l'oggetto reale si discosti da quello teorico. Anche questo appare un vantaggio, dopotutto con

un'informazione del genere appare ancora più plausibile poter affrontare poi uno studio sulla miglìoria con già obiettivi chiari.

La debolezza del sistema è la grande mole di dati necessaria ad una valutazione. Questo può portare ad un grande dispendio di tempo se il laboratorio non è già approntato per questo lavoro o non viene adibito a questo una sua zona.

Può quindi essere interessante la verifica della possibilità di rendere “automatica” tale procedura al fine di creare un dispositivo adatto anche ad una caratterizzazione “online” per controllo di processo in linee di produzione industriali.

Dal punto di vista del dispositivo testato si è verificato un elevato angolo di accettazione, di circa 2 gradi, ed un livello di concentrazione in linea con le attese geometriche.

È stato anche possibile verificare che, tranne che in situazioni di forte disallineamento angolare, i raggi entranti subiscono mediamente una sola riflessione e questo dato permette di rilassare i requisiti per la formazione della superficie riflettente (fornendo importanti indicazioni per una produzione di massa del componente). Se il risultato avesse evidenziato riflessioni multiple una metallizzazione di qualità non ottimale avrebbe ridotto in maniera molto significativa l'efficienza del sistema poiché la perdita per riflessione viene moltiplicata per il numero di riflessioni.

Benché, quindi, manuale e, per alcuni aspetti, grossolana questa tecnica ha permesso di rispondere ai quesiti inizialmente posti sul sistema e il lavoro può quindi essere considerato concluso con successo.



## BIBLIOGRAFIA

- Handbook of optics (1995), Sponsored by Optical Society of America; Bass, Van Stryland, Williams, Wolfe; McGraw-Hill Inc.
- The optics of nonimaging concentrators, light and solar energy (1978); Welford, Winston; Academic Press Inc.
- D. Jenkins and R. Winston, "New reflectors for illumination."
- <http://en.wikipedia.org>
- Manuale interno al software TracePro
- Manuale interno al software Origin
- Philip Gleckman, Joseph O'Gallagher , Roland Winston; Nature 339, 198 - 200 (18 May 1989)