

# Capitolo 1

## Introduzione

La ricerca di tecnologie atte a sviluppare nuove applicazioni nell'ambito delle energie rinnovabili è un tema molto attuale e in continua crescita. Questa tesi prevede lo studio e la simulazione, dal punto di vista ottico, di un Concentratore Fotovoltaico: un sistema utilizzato per la trasformazione della radiazione solare in energia elettrica.

### 1.1 La radiazione solare al suolo

L'energia irradiata dal Sole deriva dai processi di fusione dell'idrogeno contenuto al suo interno e si propaga in modo simmetrico nello spazio fino a raggiungere la fascia esterna dell'atmosfera terrestre.

All'interno del Sole avvengono un gran numero di reazioni nucleari di fusione, tra cui la più importante è quella che trasforma l'idrogeno in elio; questo determina la produzione di calore che viene poi trasmesso dagli strati più interni a quelli più esterni per conduzione, convezione e irraggiamento. L'energia viene poi trasferita nello spazio per irraggiamento.

La fotosfera, che è lo strato più esterno della zona convettiva solare, è la sorgente della maggior parte della radiazione solare, che complessivamente è pari a circa  $63000 \frac{kW}{m^2}$  con una temperatura equivalente di  $5779K$ .

Questo valore di potenza decresce geometricamente con la distanza e, dopo aver percorso i 149,5 milioni di Km che separano la Terra dal Sole, assume un valore molto più ridotto. Infatti, all'esterno dell'atmosfera terrestre, alla radiazione solare è associata una potenza complessiva pari a  $1367 \frac{W}{m^2}$ , la quale è denominata **costante solare**. Considerando la Fig 1.1 possiamo vedere che quando la radiazione raggiunge la Terra questa potenza è come se fosse distribuita sull'area di una sfera avente per raggio la distanza Terra-Sole  $R_{st}$ . Applicando la conservazione dell'energia possiamo affermare che

l'irraggiamento moltiplicato per l'area è costante per cui:

$$I_{cs} = I_s \frac{R_s^2}{R_{st}^2} = 1367 \frac{W}{m^2} \quad (1.1)$$

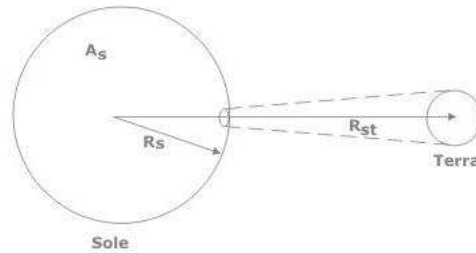


Figura 1.1: calcolo costante solare

E' noto a tutti che la distanza tra il Sole e la Terra varia periodicamente nel corso dell'anno di  $\pm 1,7\%$  conseguentemente, la costante solare all'esterno dell'atmosfera varia di  $\pm 3,3\%$ . Questa variazione può essere rappresentata dalla seguente relazione:

$$I_{ext}(t) = I_{cs}e(t) \quad (1.2)$$

dove  $e(t)$  tiene conto della varianza della costante solare in funzione del numero progressivo dei giorni dell'anno  $n(t)$  pari a:

$$e(t) = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi n(t)}{365}\right) \quad (1.3)$$

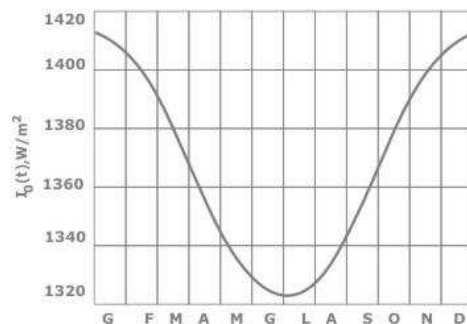


Figura 1.2: irraggiamento extratmosferico

In Figura 1.2 possiamo vedere come varia l'irraggiamento extratmosferico nel corso dell'anno e che raggiunge il valore massimo il primo Gennaio. A livello del suolo, si registra un'energia specifica minore della costante solare, a causa dei fenomeni di assorbimento e diffusione che hanno luogo nell'atmosfera, i quali modificano non solo il contenuto energetico della radiazione ma anche la sua composizione spettrale.

Il processo di assorbimento della radiazione solare varia sensibilmente in funzione della quantità di atmosfera attraversata e, per tener conto di tali fattori, si è definita la massa d'aria unitaria AM1 (Air Mass One) come lo spessore di atmosfera attraversato dal-

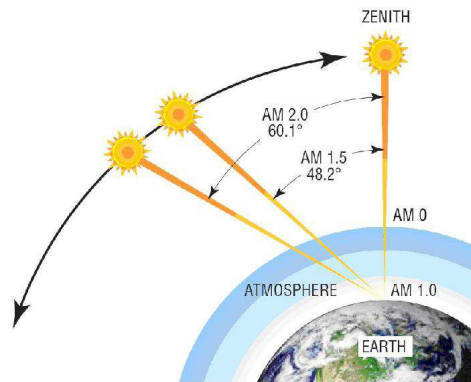


Figura 1.3: schematizzazione Air-Mass

la radiazione solare in direzione perpendicolare alla superficie terrestre e misurato al livello del mare. L'insieme dei processi di attenuazione della radiazione solare incidente sulla Terra, dovuti all'impatto con l'atmosfera, dipendono dalla lunghezza d'onda della radiazione stessa. L'intensità massima di radiazione misurata al livello del mare è sempre inferiore al valore della costante solare e vale circa  $1000 \frac{W}{m^2}$  in condizioni di giornata serena e sole a mezzogiorno. Tuttavia, tale valore è fortemente influenzato dall'andamento aleatorio delle condizioni atmosferiche.

Nel campo dei sistemi fotovoltaici viene utilizzato come riferimento lo spettro di emissione della radiazione solare con Air Mass 1.5.

## 1.2 L'energia solare

Il principio base dell'energia solare prevede la trasformazione della radiazione solare, che incide sulla Terra, in energia. Considerando la potenza della radiazione solare media che colpisce la Terra e la superficie la quale, istante per istante, è esposta al Sole, si determina che al suolo arriva una quantità di potenza superiore ai  $50GW$  al giorno. Una quantità enorme di energia che può essere sfruttata ma con un grande difetto: è poco concentrata e per ottenere quantità di energia significative bisogna occupare grandi aree di

superficie.

In generale, l'energia solare viene sfruttata in due campi principali, che prevedono la trasformazione della radiazione solare in:

- energia elettrica (**solare fotovoltaico**);
- calore (**solare termico**);

Essendo questo argomento di tesi rivolto all'impiego di nuove tecnologie nel campo del solare fotovoltaico, ci concentriamo sulle caratteristiche di questo ramo dell'energia solare tralasciando il solare termico.

## 1.3 Il solare Fotovoltaico

Alla base della conversione della radiazione solare in energia c'è l'effetto fotovoltaico che è quel fenomeno dove quando un sistema elementare (atomo, molecola, cristallo) viene colpito da una radiazione elettromagnetica, in questo caso la luce, il sistema colpito emette elettroni.

Prima di entrare nel dettaglio del processo di conversione è necessario fare riferimento ad alcune nozioni di fisica.

### 1.3.1 Struttura a bande di energia

Ogni materiale può essere visto secondo una struttura detta a bande di energia, dove per banda s'intende l'insieme dei livelli energetici che gli elettroni posseggono. Per un materiale possiamo distinguere tre tipologie di bande:

- **una banda di valenza:** costituita dall'insieme degli elettroni che hanno un livello energetico basso, tale da restare nei pressi dell'atomo di appartenenza;
- **una banda di conduzione:** costituita dall'insieme degli elettroni che hanno un livello energetico abbastanza alto, tale da lasciare l'atomo di appartenenza, dando origine ad una conduzione di tipo elettrico;
- **una banda proibita:** costituita dall'insieme dei livelli energetici non consentiti tra la banda di valenza e la banda di conduzione. Questa banda ha una estensione che si indica con  $E_g$ , ovvero **energy gap**, che rappresenta la quantità di energia necessaria all'elettrone per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

Come si può intuire dalla Figura 1.4, negli isolanti la banda proibita è molto grande e di conseguenza l'energy gap è elevato. In tale condizione solo pochi elettroni hanno l'energia necessaria per passare nella banda di conduzione, quindi l'isolante non conduce. Nei materiali conduttori, le due bande sono sovrapposte, eliminando di fatto la banda proibita, ed è per questo motivo che la maggior parte degli elettroni possiede già l'energia necessaria per passare in banda di conduzione e dare origine al flusso elettrico. Nei materiali semiconduttori la banda proibita è molto piccola e di conseguenza l'energy gap è limitato, sarà quindi sufficiente un fotone di energia pari ad  $E_g$  per "sbalzare" un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione. Tale fenomeno prende il nome di **effetto fotoelettrico**.

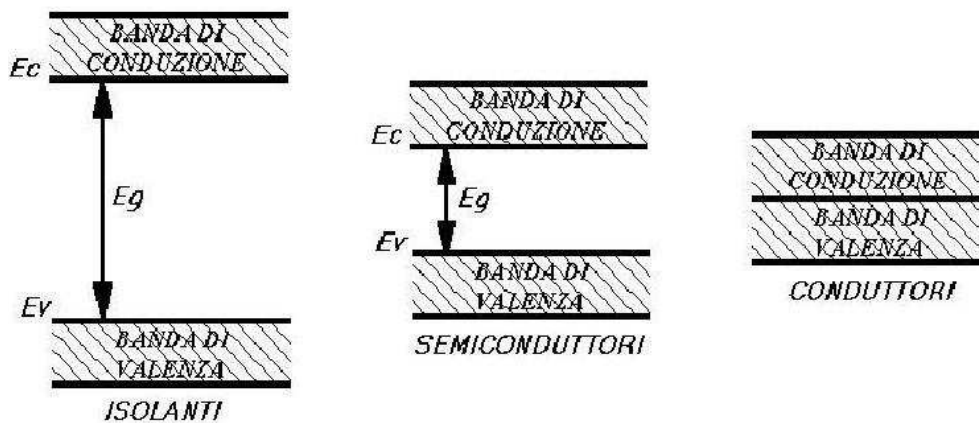


Figura 1.4: Modello a bande

### 1.3.2 L'effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico è dovuto all'emissione di un elettrone da una superficie, solitamente metallica, quando questa viene colpita da un fotone avente una frequenza superiore ad un certo valore di soglia che dipende dal tipo di metallo.

L'interpretazione della luce come insieme di particelle elementari detti fotoni risale al 1905 grazie ad Albert Einstein. Egli spiegò che gli scambi di energia tra la radiazione e la materia avvengono in modo quantistico e che la radiazione stessa è composta da quanti di energia, i fotoni.

L'energia di un fotone di frequenza  $\nu$  è pari a:

$$E = h\nu \quad (1.4)$$

dove  $h$  rappresenta la costante di Planck.

Tornando all'effetto fotoelettrico, affinché un elettrone passi dalla banda di valenza a quella di conduzione è necessario che:

$$h\nu \geq E_g \quad (1.5)$$

da cui

$$\nu \geq \frac{E_g}{h} \quad (1.6)$$

Esiste per cui una frequenza minima data dalla (1.6), per cui al di sotto di tale soglia non si ha effetto fotoelettrico perciò anche se un fotone incide con energia superiore all'energy gap non si ha il salto dalla banda di valenza a quella di conduzione. Invece, al di sopra della frequenza di soglia, se  $E_{fotone} \geq E_g$  allora si avrà la generazione di un elettrone libero con energia cinetica pari a:  $E_c = E_{fotone} - E_g$ .

Tale energia cresce in maniera direttamente proporzionale alla frequenza.

Tale fenomeno, non si verifica soltanto nei metalli, ma in un qualsiasi sistema elementare investito da una radiazione elettromagnetica, perciò anche nei semiconduttori.

### 1.3.3 Coppie elettrone-lacuna

Prendiamo in esame la struttura atomica del silicio cristallino. Vediamo che ogni atomo possiede 14 elettroni, quattro dei quali, i più esterni, sono condivisi con altrettanti atomi di silicio legati insieme mediante legami covalenti.

Come visto in precedenza, tali legami possono essere spezzati mediante l'apporto di una quantità di energia sufficiente a far passare gli elettroni di valenza a un livello energetico superiore, cioè alla banda di conduzione. Un fotone che incide con energia almeno pari all'energy gap è in grado di far "saltare" un elettrone in banda di conduzione lasciando dietro di

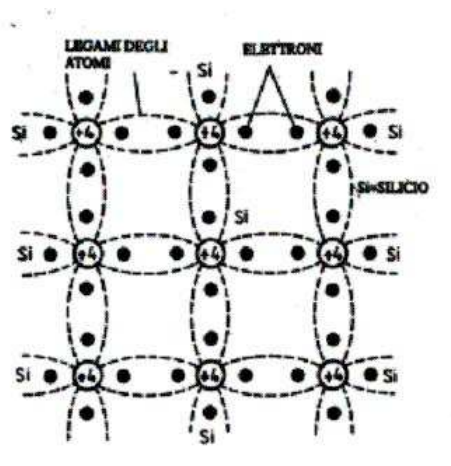


Figura 1.5: schematizzazione Air-Mass

se una buca, cioè una lacuna che verrà tempestivamente colmata da un altro elettrone di un atomo vicino, generando così delle coppie elettrone-lacuna. La generazione delle coppie elettrone-lacuna avviene in maniera disordinata per cui non si genera un flusso ordinato di cariche e quindi una corrente elettrica.

Per generare un flusso ordinato di cariche è necessario:

- immettere delle impurità controllate all'interno della struttura cristallina;
- unire due regioni di uno stesso semiconduttore, una drogata di tipo p e una di tipo n (giunzione p-n)

### 1.3.4 La cella fotovoltaica

La conversione della radiazione solare in energia elettrica avviene nella cella fotovoltaica, che costituisce il dispositivo elementare di ogni sistema fotovoltaico ed è costituito da un sottile strato di materiale semiconduttore compreso tra 0.2 e 0.35 mm (molto spesso silicio di scarto dalla lavorazione dell'industria elettronica opportunamente trattato). Affinchè, all'interno della cella, avvenga la generazione di una corrente elettrica è necessario inserire nella struttura cristallina delle impurità (processo di drogaggio). Nel caso del silicio, introducendo degli atomi di Fosforo si ottiene la formazione del silicio di tipo n avente una concentrazione maggiore di cariche negative rispetto al silicio intrinseco. Introducendo invece atomi di Boro, si ottiene la formazione del silicio di tipo p avente una concentrazione maggiore di cariche positive. Per generare un campo elettrico e quindi una corrente elettrica, occorre l'intimo contatto di due strati di silicio p e n. La tecnica del drogaggio del silicio unito al bombardamento dei fotoni, costituenti la luce solare, genera l'effetto fotovoltaico.

Purtroppo non tutta la radiazione solare viene assorbita dalla cella e quindi trasformata in energia elettrica; solo i fotoni dotati di energia sufficiente sono in grado di inizializzare il processo di conversione fotovoltaico.

Il rapporto tra la massima potenza erogabile dalla cella e l'irraggiamento solare in condizioni standard è chiamato **efficienza di conversione**.

Al fine di aumentare l'efficienza, la cella fotovoltaica viene trattata con un rivestimento antiriflettente costituito dalla deposizione di un sottile strato di ossido di Titanio ( $TiO_2$ ) in grado di ridurre la componente solare riflessa.

La potenza di una cella fotovoltaica varia in funzione della temperatura e dell'irraggiamento solare incidente.

Allo scopo di confrontare le caratteristiche delle diverse celle solari, sono

state definite delle condizioni standard di riferimento imposte dalle norme internazionali:

1. **radiazione incidente:**  $1000 \frac{W}{m^2}$ ;
2. **temperatura moduli:**  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
3. **spettro:** 1.5 AM;
4. **vento:**  $0 \frac{m}{s}$ .

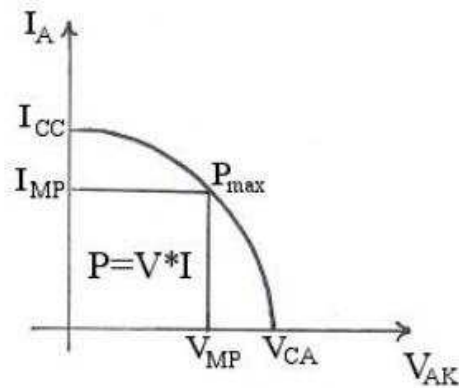


Figura 1.6: curva caratteristica V-I di una cella fotovoltaica

La connessione serie-parallelo delle singole celle fotovoltaiche costituisce il **pannello fotovoltaico** che permette di raggiungere valori di tensione e corrente desiderati; a sua volta la connessione serie-parallelo di più pannelli fotovoltaici costituisce il **generatore fotovoltaico**.

### 1.3.5 Efficienza di una cella fotovoltaica

L'efficienza delle comuni celle fotovoltaiche si aggira intorno al 10 – 18 %, e nella Figura 1.7 possiamo vedere alcuni dei motivi fondamentali di questo basso rendimento.

Un buon 56 % viene perso per la natura della luce, cioè non tutti i fotoni hanno energia sufficiente per far "saltare" gli elettroni in banda di conduzione oppure, la frequenza è inferiore al limite di soglia per cui anche avendo energia sufficiente al "salto" non avviene l'effetto fotovoltaico. Un'altro 5-6 % è dovuto al fenomeno di ricombinazione, che avviene quando un elettrone passa dalla banda di conduzione alla banda di valenza con l'emissione di un fotone



e, infine un'altro 2-3 % è dovuto al altri motivi che sono in parte dovuti alle modalità di costruzione delle celle.

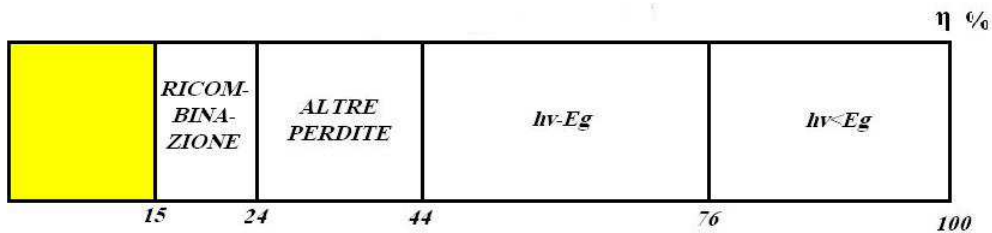


Figura 1.7: fonti di inefficienza per una cella

I pannelli fotovoltaici a base silicea più comuni si assestano intorno ai seguenti rendimenti:

- 15 % moduli in silicio monocristallino;
- 13 % moduli in silicio policristallino;
- 6 % moduli in silicio intrinseco.

Applicazioni particolari in campo aereo spaziale hanno raggiunto rendimenti dei moduli fotovoltaici anche del 40 %.

Per far fronte al problema dell'inefficienza le strade percorribili sono due:

- utilizzare tecniche di produzione dei pannelli solari molto sofisticate che utilizzano materiali rari, alcune volte altamente tossici e costosi;
- aumentare la radiazione solare incidente per unità di superficie affiancando alle celle fotovoltaiche sistemi di concentrazione ottica.

## Capitolo 2

# I Concentratori Fotovoltaici

Un'alternativa ai pannelli solari convenzionali sono i cosiddetti **systemi solari a concentrazione**, tecnologia non innovativa visto che sistemi del genere sono largamente usati nel campo del solare termico, ma risultati interessanti si sono ottenuti anche nel campo del solare fotovoltaico.

### 2.1 Descrizione generale del sistema

Un Concentratore solare è un dispositivo ottico che lavora prevalentemente sulla radiazione solare diretta convogliando i raggi incidenti su un'area via via più piccola. Questa tecnologia permette di aumentare la densità di flusso della radiazione incidente e di diminuire le dimensioni delle celle fotovoltaiche. In condizioni di cielo sereno, il flusso raggiunge anche valori di  $900 \frac{W}{m^2}$ .

Un problema dei sistemi a concentrazione è dovuto al fatto che per aumentare l'efficienza non è possibile utilizzare le celle solari convenzionali, perchè difettano di essere prodotte con un unico materiale semiconduttore caratterizzato da un energy gap specifico che non gli permette di convertire tutto lo spettro solare.



Figura 2.1: multigiunzione serie

Una soluzione è quella che prevede l'utilizzo di celle solari a multigiunzione basate su semiconduttori del gruppo III-V. Come si può notare dalla Figura 2.1, la modalità di costruzione prevede la deposizione in serie di più strati di semiconduttori, ognuno creato in modo particolare da essere sensibile ad una determinata lunghezza d'onda dello spettro solare, con conseguente aumento dell'efficienza della cella.

L'aumento dell'efficienza viene però pagato in termini di:

- alti costi di produzione e complessità realizzativa;
- se uno strato della cella smette di funzionare tutta la cella non produce più energia;
- presenza scarsa in natura dei materiali monocristallini necessari per produrre i substrati;
- la cella deve essere supportata da un adeguato sistema di raffreddamento per diminuire la temperatura del dispositivo.

Recentemente alcuni enti di ricerca hanno realizzato celle ad alta efficienza con un approccio che prevede il collegamento in parallelo di ogni strato con una diminuzione di alcune problematiche e con buoni rendimenti di conversione.

## 2.2 Teoria generalizzata dei concentratori ottici

In questa sezione andiamo ad analizzare la parte ottica di un Concentratore Fotovoltaico dal punto di vista teorico. La tecnologia dei Concentratori, per sfruttare le proprietà di efficienza, deve essere supportata da un'efficace tecnica di progettazione degli apparati ottici. Questi devono essere in grado di funzionare in perfetto allineamento col disco solare, ma anche saper gestire situazioni di disallineamento. Nel caso di Concentratori composti da più elementi ottici è buona norma andare a progettare ogni componente ottico singolarmente, per poi andare ad assemblare virtualmente tutto il sistema prima di passare all'eventuale produzione.

Un Concentratore ottico può essere immaginato come una scatola nera, caratterizzato da un ingresso formato da una certa area  $A$  ed un'uscita caratterizzata da un'area  $a < A$  (Figura 2.2a). L'obiettivo è quello di cercare di trasferire la massima radiazione luminosa da una fonte ad un obiettivo tramite il Concentratore (**non-imaging optics**).

Una regola fondamentale da tener presente e che non è possibile cercare di concentrare la radiazione incidente mantenendo costante la divergenza in ingresso e in uscita dal Concentratore. Infatti, secondo il teorema di Liouville, ipotizzando di avere un concentratore ideale senza perdite, allora il prodotto:

$$A \cos(\theta) = cost \quad (2.1)$$

Infatti andando ad analizzare graficamente il teorema (in Figura 2.2), possiamo vedere come andando a diminuire la superficie di concentrazione, automaticamente deve aumentare la divergenza della radiazione incidente.

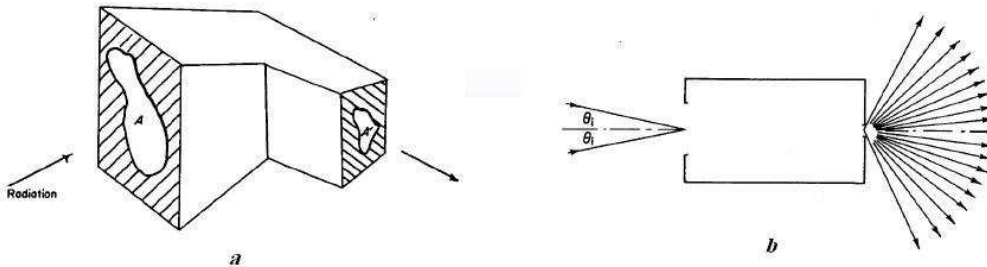


Figura 2.2: schematizzazione dei Concentratori

Il più semplice Concentratore che può essere realizzato non è altro che una lente sottile di focale  $f$ , dove per lunghezza focale s'intende la distanza dell'immagine dal centro della lente, nel caso in cui l'oggetto da focalizzare si trovi all'infinito (Figura 2.3). Nel nostro caso la lente deve essere convergente e deve focalizzare tutta la radiazione in una superficie più piccola.

Prendiamo in considerazione un sistema caratterizzato da un'apertura (a) detta **aperture stop**, che corrisponde al semidiametro della lente di focale  $f$  e un'apertura sul piano immagine di raggio  $f\theta$  detta **field stop** (Figura 2.4a). Affinche il Concentratore funzioni al massimo della sua efficienza bisogna far sì che tutti i raggi incidenti sul sistema entrino nell'apertura posta sul piano immagine; è proprio il field stop che determina un parametro molto importante detto **accettazione**

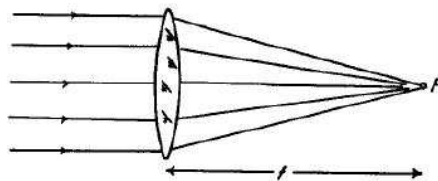


Figura 2.3: lente di focale  $f$

### angolare.

Questo parametro indica di quanti gradi può essere inclinata, rispetto alla perpendicolare del sistema, la radiazione incidente affinché venga tutta concentrata nell'apertura  $f\theta$ . Quindi, se la radiazione luminosa incide nel sistema con un angolo inferiore a quello di accettazione, di conseguenza il **flusso si conserva**, perciò il flusso in ingresso al Concentratore passante per (a) coincide con il flusso passante per ( $f\theta$ ).

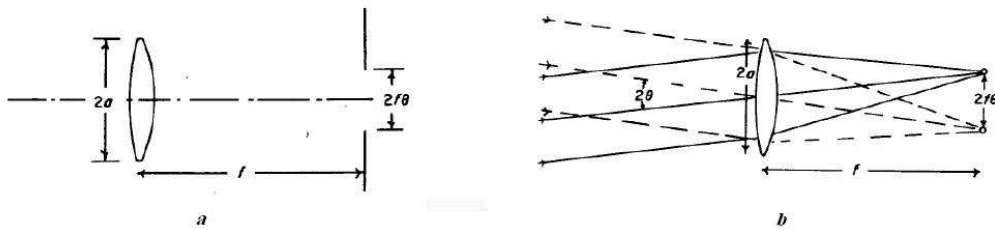


Figura 2.4: angolo di accettazione

Un parametro da tenere in considerazione è la divergenza dei raggi solari che arrivano sulla Terra. Infatti, nonostante il Sole possa essere considerato una sorgente all'infinito, esso non è puntiforme ma un disco (**disco solare**). La divergenza massima può essere quindi espressa dalla formula:

$$\theta_{max} = \arctan\left(\frac{d_{sun}}{2L_0}\right) \quad (2.2)$$

dove  $d_{sun}$  è il diametro del Sole e  $L_0$  è la distanza tra la Terra e il Sole. Andando a sostituire i valori si trova che:

$$\theta_{max} = 0.266^\circ \quad (2.3)$$

Considerando un Concentratore ideale, perfettamente aplanatico, su cui incide una radiazione con angolo massimo di accettazione pari alla divergenza solare, questo ha un'efficienza massima pari ad 1 fino a  $\theta_{max}$  e per  $\theta > \theta_{max}$  il rendimento è pari a zero.

Purtroppo i sistemi reali sono difettati dalle aberrazioni che fanno sì di non concentrare tutti i raggi all'interno della superficie d'uscita, perciò l'efficienza ha un andamento reale che corrisponde alla linea rossa del grafico di Figura 2.5.

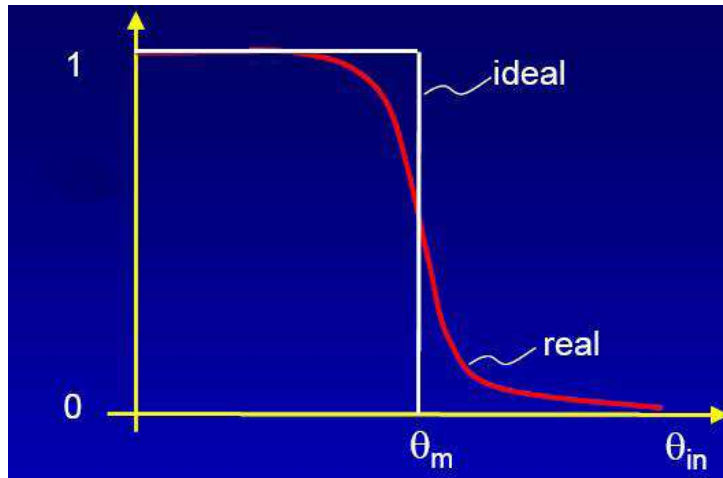


Figura 2.5: efficienza di concentrazione

### 2.2.1 Elementi di Fotometria

Un Concentratore Fotovoltaico non è altro che un sistema ottico che serve a raccogliere la radiazione di interesse per focalizzarla su una superficie sensibile che, a sua volta, trasformerà la radiazione in un segnale elettrico. Il calcolo della quantità di radiazione raccolta e trasformata diventa quindi un parametro fondamentale del sistema. Per far questo bisogna introdurre i concetti basilari del trasferimento geometrico della radiazione.

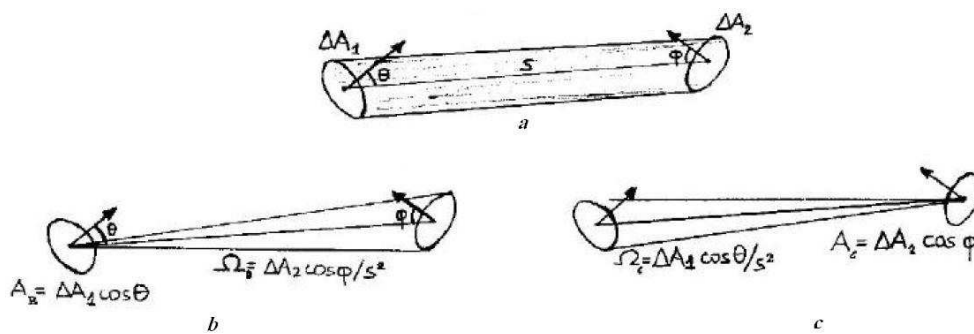


Figura 2.6: proprietà del raggio

Alla base della teoria di trasferimento della radiazione, c'è il concetto di **raggio di luce**, definito come un fascio di flusso radioattivo di sezione infinitesima. Ipotizziamo che tale raggio connetta due superfici infinitesime di area  $\Delta A_1$  e  $\Delta A_2$  poste a distanza  $s$  ed immerse in un mezzo omogeneo. Di conseguenza, tutta la potenza radioattiva trasportata dal fascio che fluisce

da  $\Delta A_1$  deve fluire anche da  $\Delta A_2$  (Figura 2.6a).

Un'altro concetto molto importante è la **rapidità ottica** del raggio di luce, che non è altro che il prodotto tra l'area efficace del raggio e l'angolo solido proiettato lungo la direzione di propagazione del raggio stesso.

L'angolo solido proiettato, sotteso da una superficie A a distanza s da un punto è pari a:

$$\frac{A \cos(\theta)}{s^2} \quad (2.4)$$

dove  $\theta$  non è altro che l'angolo compreso tra la normale della superficie e la direzione di propagazione s.

Se consideriamo la superficie  $\Delta A_1$  della Figura 2.6b allora la rapidità ottica del raggio, per definizione, è pari a:

$$\Delta U_1 = (\Delta A_1 \cos \theta) \left( \frac{\Delta A_2 \cos \phi}{s^2} \right) \quad (2.5)$$

Analogamente se consideriamo la superficie  $\Delta A_2$  della Figura 2.6c allora la rapidità ottica risulta:

$$\Delta U_2 = (\Delta A_1 \cos \phi) \left( \frac{\Delta A_1 \cos \theta}{s^2} \right) \quad (2.6)$$

Le espressioni 2.5 e 2.6 sono evidentemente uguali, per cui si può affermare che in un mezzo omogeneo la rapidità ottica di un raggio di luce è costante. Un'altro concetto importante è quello di **brillanza** che è la quantità totale di energia radiante che per unità di tempo attraversa l'unità di superficie, provenendo da un angolo solido unitario intorno ad una direzione prefissata. La brillanza è definita quindi, come la potenza per unità di superficie e per unità di angolo solido. Da questa definizione possiamo affermare che anche la potenza della radiazione è una costante lungo il fascio di luce e che la brillanza può essere vista come rapporto tra la potenza e la rapidità ottica:

$$B_1 = \frac{\Delta W}{\Delta U_1} = \frac{\Delta W}{\Delta U_2} = B_2 \quad (2.7)$$

Riprendiamo in considerazione il nostro Concentratore elementare formato da una lente di focale f ed andiamo a dimostrare che la rapidità ottica di un fascio, che attraversa una lente convergente, si conserva (Figura 2.7).

Tutti i calcoli verranno considerati sotto la condizione di **ottica parassiale**, per cui con angoli di incidenza molto piccoli e nell'intorno dell'asse ottico.

Se la rapidità ottica attraverso una lente convergente è conservata, occorre dimostrare che:

$$A_{in}\Omega_{in} = A_{out}\Omega_{out} \quad (2.8)$$

La rapidità ottica d'ingresso del sistema non è altro che il prodotto dell'area della lente per l'angolo solido, per cui:

$$U_{in} = A_{in}\Omega_{in} = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \left(\frac{\pi\theta_{in}^2}{4}\right) \quad (2.9)$$

mentre in uscita risulta:

$$U_{out} = A_{out}\Omega_{out} = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \left(\frac{\pi\theta_{out}^2}{4}\right) \quad (2.10)$$

Per piccoli angoli e per la definizione di distanza focale, possiamo affermare che  $\theta_{in} \cong \frac{d}{f}$  e similmente anche  $\theta_{out} \cong \frac{D}{f}$ , per cui:

$$D\theta_{in} = d\theta_{out} \quad (2.11)$$

Elevando al quadrato l'uguaglianza 2.11 si ottiene proprio la condizione 2.8 (come volevasi dimostrare). Infatti, avendo imposto la conservazione di tutti i raggi del fascio ottico attraverso la lente, abbiamo ottenuto la conservazione della rapidità ottica, risultato che deriva direttamente dal principio di conservazione dell'energia.

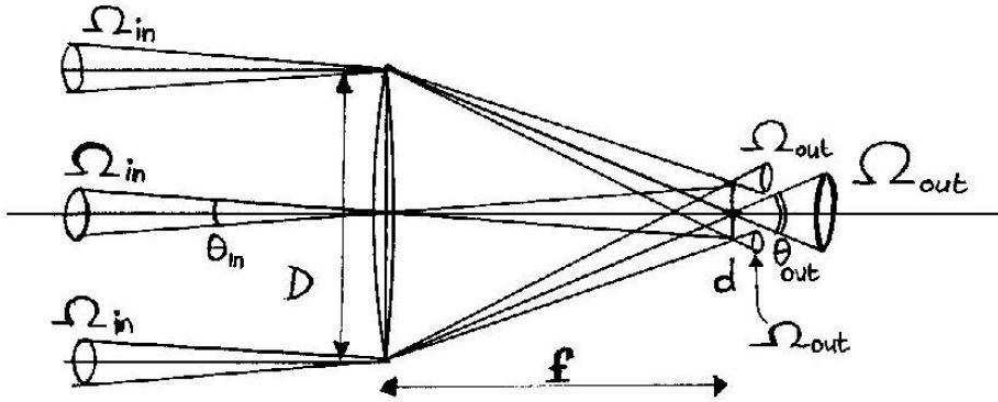


Figura 2.7: Conservazione della rapidità ottica attraverso una lente convergente

Sfruttando il risultato appena dimostrato possiamo andare a definire un'altro parametro fondamentale che è il **fattore di concentrazione**. Considerando i Concentratori in maniera generalizzata, all'interno del sistema la rapidità ottica si conserva, per cui:

$$(A\theta)^2 = (A'\theta')^2 \quad (2.12)$$



e da questa uguaglianza andiamo a definire il fattore di concentrazione come:

$$C = \left(\frac{A}{A'}\right)^2 = \left(\frac{\theta'}{\theta}\right)^2 \quad (2.13)$$

Tutti i risultati trovati finora vanno bene per sistemi ottici immersi in sistemi omogenei. Ora andiamo a vedere cosa succede nel caso generalizzato di un raggio di luce che attraversa un mezzo non omogeneo (Figura 2.8).

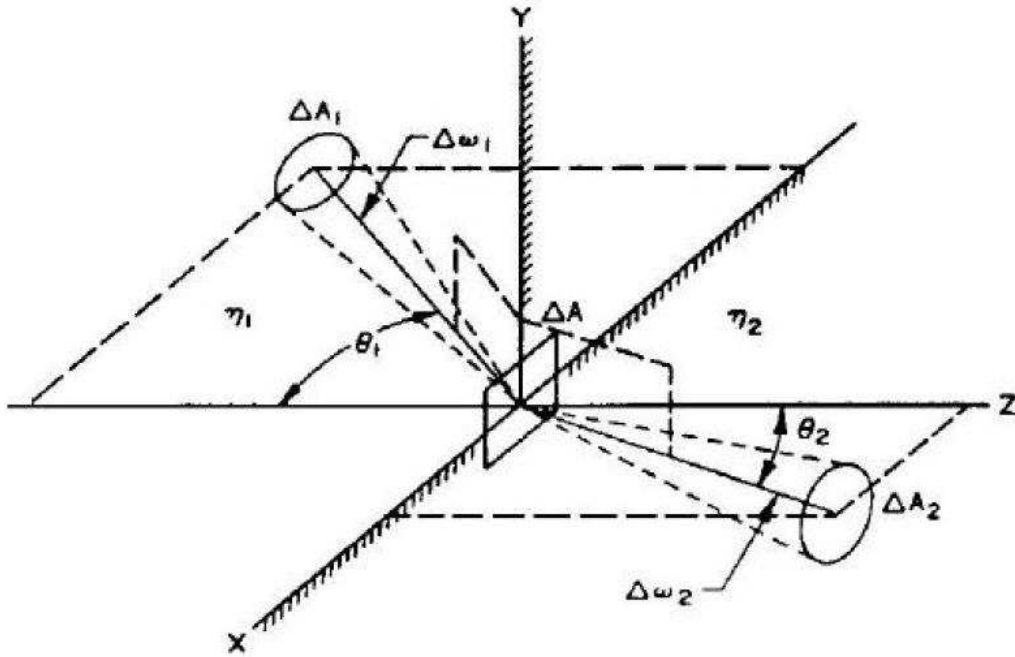


Figura 2.8: proprietà di un raggio di luce che si propaga in un mezzo non omogeneo

Consideriamo stavolta un raggio di luce che attraversi una superficie di separazione tra due mezzi a differente indice di rifrazione ( $n_1$  e  $n_2$ ). Il raggio che incide sulla superficie di separazione, cambia direzione a causa della rifrazione sulla superficie infinitesima  $\Delta A$ . Prendiamo questa volta per semplicità  $\Delta A_1$  e  $\Delta A_2$  normali al raggio, per cui essendo la normale coincidente con la direzione di propagazione si ha che  $\Delta A_1 \cos \phi_1 = \Delta A_1$  e  $\Delta A_2 \cos \phi_2 = \Delta A_2$  (essendo  $\phi_1$  e  $\phi_2$  gli angoli tra le normali delle rispettive superfici e la direzione di propagazione). La potenza trasportata dal raggio di luce che arriva su  $\Delta A$  sarà quindi:

$$\Delta W = \frac{B_1 \Delta A_1 \Delta A \cos \theta_1}{s_1^2} \quad (2.14)$$

dove con  $s_1$  e  $s_2$  indicano le distanze tra  $\Delta A$  e rispettivamente  $\Delta A_1$  e  $\Delta A_2$ . Ipotizzando che la potenza del raggio riflesso dalla superficie di separazione dei due mezzi sia trascurabile, allora per la conservazione della potenza dovrà risultare:

$$\Delta W = \frac{B_1 \Delta A_1 \Delta A \cos \theta_1}{s_1^2} = \frac{B_2 \Delta A_2 \Delta A \cos \theta_2}{s_2^2} \quad (2.15)$$

La relazione tra gli angoli  $\theta_1$  e  $\theta_2$  è data dalla legge di Snell, per cui:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$  e andando a derivare rispetto a  $\theta$  otteniamo  $n_1 \Delta \theta_1 \cos \theta_1 = n_2 \Delta \theta_2 \cos \theta_2$ . Moltiplicando le ultime due relazioni otteniamo:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = \frac{\sin \theta_1 \Delta A_1 \cos \theta_1}{\sin \theta_2 \Delta A_2 \cos \theta_2} \quad (2.16)$$

Sfruttando la relazione 2.16 e modificando algebricamente la 2.15 si ha:

$$B_2 = B_1 \left( \frac{\frac{\Delta A_1 \cos \theta_1}{s_1^2}}{\frac{\Delta A_2 \cos \theta_2}{s_2^2}} \right) = B_1 \frac{\cos \theta_1 \Delta \omega_1}{\cos \theta_2 \Delta \omega_2}$$

;

$$B_2 = B_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \quad (2.17)$$

L'ultima relazione è molto importante in radiometria e prende il nome di **teorema della brillantezza**.

A questo punto, è possibile definire il **fattore di concentrazione** di un Concentratore ottico immerso in un mezzo non omogeneo come:

$$C = \left(\frac{A}{A'}\right)^2 = \left(\frac{n' \theta'}{n \theta}\right)^2 = \left(\frac{n' \sin \theta'}{n \sin \theta}\right)^2 \quad (2.18)$$

Dato un Concentratore, si definisce **limite di concentrazione** il fattore massimo di concentrazione che si ottiene minimizzando il denominatore, ottenendo:

$$C_{max} = \left(\frac{A}{A'_{min}}\right)^2 = \left(\frac{n'}{n \sin \theta}\right)^2 \quad (2.19)$$

Se consideriamo il caso di un Concentratore ideale immerso in aria su cui incide la radiazione solare, allora il valore massimo di concentrazione risulta:

$$C_{max} = \left(\frac{1}{\sin 0.266}\right)^2 \approx 46000 \quad (2.20)$$

Nella pratica questo valore non potrà mai essere raggiunto avendo imposto un valore di  $\theta' = 90^\circ$  che non ha nessun interesse pratico.

Comunque,  $C_{max}$  rimane un valore di riferimento nella costruzione dei Concentratori. Lo sviluppo tecnologico in questo settore ha come obiettivo quello di realizzare Concentratori con un fattore di concentrazione il più vicino possibile al limite teorico, anche se rimane tuttavia un limite irraggiungibile visto che il valore di  $C_{max}$  può essere raggiunto solo nei sistemi aplanatici, ovvero privi di aberrazione sferica, curvatura di campo, coma.

## 2.3 Classificazione dei Concentratori Fotovoltaici

Andiamo a fare una classificazione dei più comuni Concentratori Fotovoltaici andando ad analizzare le differenze dei sistemi ottici che implementano. Tutti i Concentratori in elenco utilizzano come superficie sensibile di trasformazione una cella solare.

1. **Concentratori a lenti:** sono sistemi che sfruttano le proprietà delle lenti per convergere la radiazione luminosa su varie celle di piccole dimensioni. La radiazione luminosa colpisce le lenti che mettono a fuoco i fasci incidenti in un punto particolare detto fuoco. Ed è proprio in questo punto che tramite un sistema di distanziatori vengono posizionate le celle;
2. **Concentratori con lenti di Fresnel:** sono sistemi che utilizzano un particolare tipo di lente, detta di Fresnel, che permette la costruzione di ottiche di grandi dimensioni e piccola distanza focale. La costruzione prevede il frazionamento di una lente sferica in varie sezioni concentriche chiamate anelli di Fresnel, in tali zone lo spessore della lente viene limitato trasformando la curva continua in una serie di superfici con la stessa curvatura ma non continue. Questo tipo di concentratore risulta più leggero rispetto a quelli che implementano lenti tradizionali;
3. **Concentratori con specchi asferici:** sono sistemi che sfruttano la proprietà di alcune superfici come ad esempio parabole o ellissi che sono in grado di riflettere un fascio incidente sulla loro superficie in un punto particolare dello fuoco. Dal punto di vista teorico queste superfici vengono studiate sfruttando il principio di Fermat che dimostra che affinché un'onda piana incidente converga in un unico punto (fuoco) è necessario che i cammini ottici di tutti i raggi devono essere uguali;
4. **Concentratori con ottica Cassegrain:** questi sistemi rispetto a quelli precedenti utilizzano due superfici ottiche. Il principio di funzionamento prevede che la radiazione incidente colpisce uno specchio primario che riflette i raggi, concentrandoli, in uno specchio secondario,

che a sua volta converge nuovamente i raggi verso il primario in un punto particolare che prende il nome di fuoco del sistema.

5. **Concentratori solari con guida ottica:** questi sistemi sono tra i più innovativi presenti sul mercato. Si tratta di un componente sottile, in genere in acrilico, che grazie alla sua particolare forma interna guida la luce verso il suo centro, concentrandola fino a 1400 soli. La progettazione di questo piccolo dispositivo si basa su un fenomeno chiamato Riflessione Interna Totale, ossia la possibilità che ha un fascio di luce di penetrare un materiale ottico ed essere deviato invece di essere riflesso. Il vantaggio sta nel fatto che si possono sfruttare superfici in plastica, molto più economiche rispetto a lenti o specchi, costruite in modo tale da piegare il fascio luminoso in una determinata direzione cercando di controllare criticamente gli angoli una volta che la luce penetra nella superficie. Un'altro vantaggio sta nel fatto che la cella solare è implementata direttamente nella superficie del concentratore, senza presentare camere d'aria tra ottica e cella solare.

Nella Figura 2.9, possiamo vedere alcune delle diverse ottiche dei concentratori.

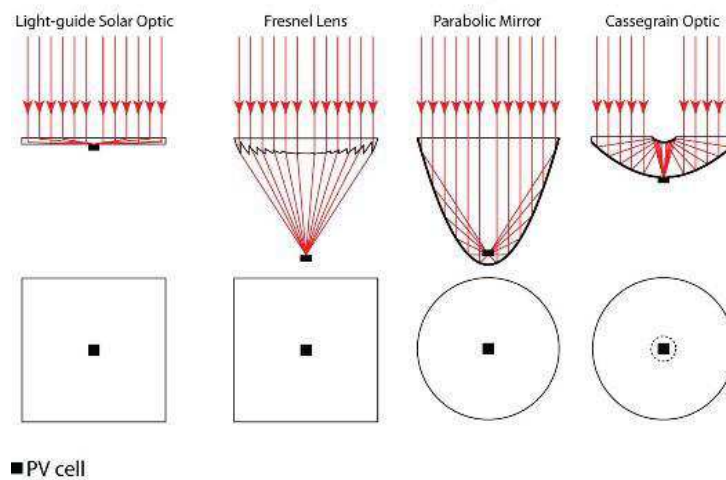


Figura 2.9: Concentratori solari

Andando a confrontare i vari tipi di Concentratori, prendendo come parametro di riferimento il fattore di concentrazione, allora i sistemi che utilizzano come

componenti ottici le lenti sono quelli che presentano più difficoltà nel raggiungere alti valori di Concentrazione perchè sono soggetti a molte aberrazioni. Sistemi che implementano specchi di tipo parabolico, ellittico o iperbolico hanno la peculiarità di essere privi di aberrazione sferica e aberrazione cromatica e nonostante siano influenzati da coma e curvatura di campo, raggiungono valori di Concentrazione molto più alti.

# Capitolo 3

## Descrizione e analisi teorica del nostro Concentratore

Il Concentratore che vogliamo realizzare implementa una configurazione di tipo Cassegrain, con l'utilizzo di una cella fotovoltaica in corrispondenza del vertice dello specchio primario. In questo capitolo andremo a descrivere ed analizzare gli aspetti teorici e progettuali di questo sistema.

### 3.1 La Configurazione Cassegrain

La Configurazione Cassegrain è stata utilizzata per la prima volta in un particolare telescopio, noto appunto col nome di "Telescopio Cassegrain", che implementa un sistema riflettente formato da uno specchio primario a forma di paraboloide, forato al centro, e un secondario di forma ellissoidale. Il principio di funzionamento prevede la raccolta della radiazione luminosa da parte del primario che riflette i raggi verso lo specchio secondario. A sua volta il secondario riflette nuovamente i raggi verso il primario andando a focalizzare l'immagine in un punto al di sotto del foro di apertura.

Col diffondersi di questa configurazione, nel tempo si sono effettuate diverse modifiche sui componenti ottici che a loro volta sono state montate in diversi strumenti ottici. In generale però il principio di funzionamento è rimasto invariato.

Quello che vogliamo realizzare è un Concentratore che implementa un sistema ottico "tipo Cassegrain", formato da un primario non forato, con al centro, in corrispondenza del vertice, la cella solare e un secondario capace di focalizzare la radiazione non sotto il primario (come nella configurazione classica), ma bensì in corrispondenza della cella fotovoltaica.

### 3.1.1 I componenti ottici implementati

Dalla teoria dell'ottica si sa che la proprietà di riflettere la luce, focalizzandola in un punto preciso, è una caratteristica di tutte le curve coniche di rivoluzione. Analiticamente possiamo esprimere tali curve in funzione dell'eccentricità  $e$  e del raggio di curvatura  $R$ .

$$z = 2(1 - e^2) - 2Rz + r^2 = 0 \quad (3.1)$$

In Figura 2.1 abbiamo un grafico e una tabella che rappresentano le varie curve al variare del parametro  $k = -e^2$  che prende il nome di **costante conica**.

$k < -1$ ( $ e  > 1$ )	iperboloide
$k = -1$ ( $ e  = 1$ )	paraboloide
$-1 < k < 0$ ( $0 <  e  < 1$ )	Ellissoide prolato
$k = 0$ ( $e = 0$ )	Sfera
$k > 0$ ( $e^2 < 0$ )	Ellissoide oblato

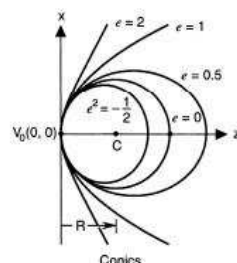


Figura 3.1: superfici coniche di rivoluzione

Utilizzare superfici di tipo sferico sarebbe la soluzione più semplice sia per l'analisi teorica che per la successiva fase di fabbricazione della superficie stessa. Il problema è che uno specchio di tipo sferico è difettato dall'**aberrazione di sfericità**.

Consideriamo una porzione estesa di uno specchio sferico (come in figura), dove la radiazione luminosa non lo colpisce solo in una ristretta zona attorno all'asse ottico, ma anche ai bordi di tale superficie.

Andando ad analizzare i raggi riflessi si nota che non sono tutti focalizzati nel fuoco del sistema, ma si distribuiscono in una zona nell'intorno di tale punto. In particolare, i raggi che colpiscono la superficie verso i bordi

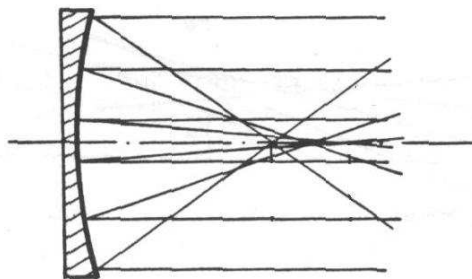


Figura 3.2: aberrazione sferica

sono maggiormente deviati rispetto ai raggi centrali e questo difetto è noto come **aberrazione sferica**.

Tale anomalia potrebbe compromettere il rendimento dell'intero sistema con difficoltà, da parte dello specchio secondario, nel focalizzare i raggi e quindi minore energia generata dalla cella fotovoltaica. Per risolvere tale problema bisogna utilizzare una superficie **stigmatica**, cioè caratterizzata dal fatto di essere in grado di focalizzare tutti i raggi in un unico punto. Curve stigmatiche sono la parabola, l'iperbole e l'ellisse.

Ricordiamo che l'obiettivo da raggiungere, nel progetto di un Concentratore, è quello di riuscire a rendere il fattore di concentrazione il più vicino possibile al limite teorico ( $C_{max} \approx 46000$ ), limite che vale solo nel caso di una superficie aplanatica e quindi priva di aberrazione sferica, di coma e di curvatura di campo.

Una soluzione è quella che prevede l'utilizzo di uno specchio di tipo parabolico, che è stigmatico, per cui non è soggetto all'aberrazione sferica, però è difettato dall'**aberrazione di coma**.

Il coma è un difetto che può essere definito come la variazione dell'ingrandimento ottico con l'apertura. Quello che succede è che i raggi più inclinati, passanti verso il bordo della lente, sono "immaginati" ad un'altezza diversa rispetto ai raggi che passano per il centro. Per cui sul piano immagine invece di avere uno spot circolare si ha uno spot di forma allungata, simile ad una goccia. Questo è uno dei peggiori difetti, a causa della forma asimmetrica dello spot, che non permette di determinare facilmente il centroide. Però, in questo caso, non stiamo facendo "imaging" e il nostro obiettivo è trasferire la maggior radiazione possibile sulla cella fotovoltaica, perciò è un difetto gestibile.

## 3.2 Parametri di vincolo del progetto

Il progetto prevede di realizzare moduli di Concentratori, ognuno dei quali deve avere una sezione quadrata di  $100cm^2$  con al centro una cella fotovoltaica di  $9mm^2$ . La distanza tra superficie primaria e secondaria deve essere di  $30mm$ .

In Figura 3.3 è rappresentata una vista verticale dei moduli.

Il sistema è dotato di un **meccanismo d'inseguimento** che è in grado di seguire il Sole in modo da avere il sistema sempre in posizione di allineamento col disco solare. Tale sistema deve riuscire a gestire situazioni di disallineamento fino ad un massimo di  $2^\circ$  d'inclinazione rispetto alla verticale. Un accorgimento utile riguarda il secondario, che deve essere di ridotte dimensioni per evitare di creare una zona d'ombra sul primario, che ridurrebbe il



rapporto di concentrazione di tutto il sistema. Inoltre, è importante sapere che le celle solari sono a sezione quadrata e lavorano meglio con una distribuzione uniforme su tutta la superficie dell'energia incidente, mentre rendono di meno con la stessa energia incidente ma concentrata in una porzione ridotta di superficie. Questo è abbastanza ovvio visto che una ridotta superficie illuminata equivale ad attivare una minor area sensibile alla conversione. Le superfici che andiamo a progettare sono di tipo sferico e generano spot di forma circolare, per cui bisogna cercare di trasformare lo spot da circolare a quadrato.

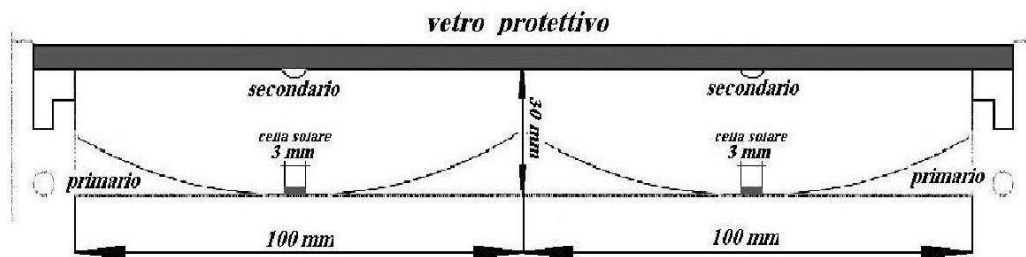


Figura 3.3: vista verticale dei moduli di concentrazione

### 3.3 Il modello matematico del sistema

Cerchiamo di costruire un modello matematico in grado di analizzare teoricamente i parametri ottici e geometrici del sistema. Il Concentratore è formato da due elementi ottici che sono: lo specchio primario e lo specchio secondario. Facendo adeguate ipotesi semplificative, è possibile costruire un modello matematico per lo specchio primario, mentre per il secondario la cosa è praticamente impossibile.

Nel caso dello specchio primario, oltre a rispettare i vincoli di progetto, considereremo le seguenti ipotesi:

- radiazione incidente proveniente dall'infinito e perfettamente perpendicolare al sistema;
- condizione di **ottica parassiale**;

Iniziamo con l'analisi del primario con l'obiettivo di trovare una funzione che modella il raggio di curvatura in funzione di  $D, d$ . Dove  $D$  è la misura di una corda perpendicolare all'asse  $y$  e che interseca la parabola ad una certa distanza dal vertice, mentre  $d$  è la distanza della corda  $D$  dal vertice della



Utilizzando le relazioni (3.2) e (3.3) e sapendo che  $\overline{PH} = d + f$ , allora:

$$d + f = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + (d - f)^2} \quad (3.4)$$

e dopo banali passaggi matematici si arriva alla seguente relazione:

$$4df = \frac{D^2}{4};$$

$$R = \frac{D^2}{8d} \quad (3.5)$$

Sostituendo i parametri di vincolo del progetto si ha:

$$R = \frac{(144)^2}{8 * 30} = 86.4mm \quad (3.6)$$

dove  $d = 30mm$  è la distanza tra secondario e primario, mentre  $D = 144mm$  è il valore dell'apertura del sistema.

Infatti, per prendere in considerazione tutti i raggi che incidono su una sezione quadrata con lato  $100mm$ , occorre considerare un'apertura circolare di diametro pari alla circonferenza circoscritta alla sezione quadrata. Il valore che rispetta tale condizione è  $D = 144mm$ .

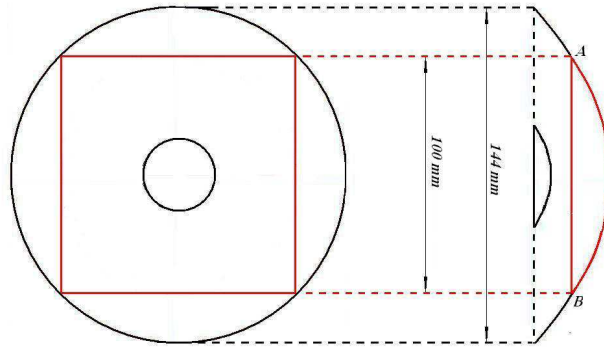


Figura 3.5: il concetto di apertura

Nella Figura 3.5 abbiamo rappresentato graficamente il concetto e come si può notare la circonferenza più grande rappresenta l'apertura di  $144mm$  circoscritta al modulo quadrato di lato  $100mm$ .

Il primario verrà preso in considerazione col raggio  $R = 86.4mm$  sia in fase

di simulazione che per l'eventuale realizzazione pratica della superficie. In quest'ultima fase però, la superficie sferica non verrà presa per intera ma tagliata in corrispondenza della corda AB pari a  $100mm$  come da parametro di vincolo del progetto.

# Capitolo 4

## Simulazione del Concentratore con ZEMAX

In questo capitolo andiamo a descrivere la simulazione del Concentratore Fotovoltaico eseguita mediante il software ZEMAX. Questo programma è usato per: il disegno e l'analisi dei sistemi ottici; il tracciamento sequenziale dei raggi attraverso gli elementi ottici; tracciamenti non sequenziali per l'analisi della luce esterna e della propagazione dei fasci; modelli di sistemi ottici come obiettivi, specchi, lenti, dispositivi di diffrazione, rivestimenti ottici per superfici e molto altro.

ZEMAX è fornito di molti strumenti di analisi che permettono di studiare le **aberrazioni** del sistema, le immagini, la polarizzazione della luce, lo studio dei raggi attraverso i **layout** e gli **spot diagram**. Una tra le funzioni più potenti che ZEMAX implementa è sicuramente l'**ottimizzazione**, che viene usata sui disegni ottici per avere una sistemazione automatica dei parametri di sistema in modo da aumentare le prestazioni e ridurre le aberrazioni.

Per lo studio del nostro sistema ottico andremo ad utilizzare solo alcune delle varie funzioni messe a disposizione da ZEMAX, in particolare useremo:

- **layout** del sistema con tracciamento dei raggi;
- **spot diagram** per l'analisi dei raggi nel punto immagine del sistema;
- **define merit function**, per eseguire l'ottimizzazione del sistema.

### 4.1 Convenzioni e definizioni

Prima di cominciare l'analisi vera e propria della simulazione, andiamo a spiegare il significato di alcuni termini che vengono spesso utilizzati nel campo ottico e le convenzioni che utilizza anche il software ZEMAX per la costruzione

dei layout dei sistemi.

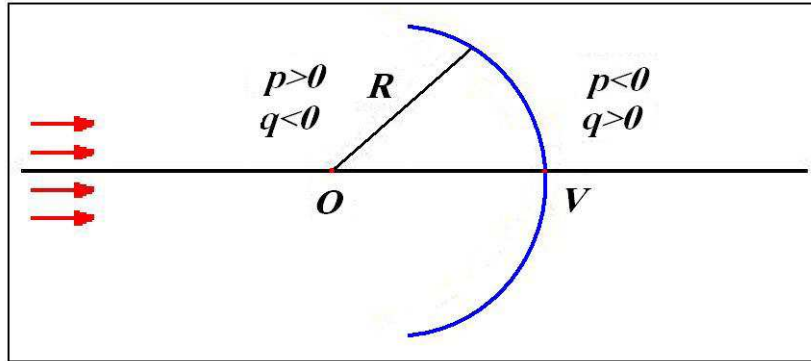


Figura 4.1: convenzione segni e posizioni

Consideriamo la figura 4.1 come modello. Fissata una superficie di discontinuità, nel nostro caso catottrica (**specchio**), e il suo vertice  $V$ , vengono rispettate le seguenti regole:

- la luce che incide sulla superficie proviene sempre da sinistra;
- la distanza  $\mathbf{p}$  di un oggetto dal vertice  $V$  è positiva se l'oggetto si trova a sinistra del vertice, in caso contrario è negativa;
- la distanza  $\mathbf{q}$  dell'immagine dal vertice  $V$  è negativa se l'immagine si trova alla sinistra del vertice, in caso contrario è positiva;
- il raggio di curvatura  $\mathbf{R}$  della superficie è positivo se il centro di curvatura si trova a destra di  $V$ , in caso contrario la curvatura è negativa.

L'elenco appena fatto indica solo alcune delle convenzioni usate in teoria per i sistemi ottici, ma sono quelle che useremo per la simulazione del sistema. Si definiscono **raggi** di un'onda luminosa, tutte le traiettorie normali ai fronti d'onda, dove per fronte d'onda intendiamo il luogo geometrico dei punti raggiunti nello stesso istante dalla perturbazione del campo elettromagnetico. La radiazione luminosa generata dal Sole (**sorgente**) si propaga secondo fronti d'onda sferici, ma considerando che la Terra si trova molto distante dalla sorgente del campo e date le dimensioni ridotte del sistema, idealmente i fronti d'onda incidenti possono essere considerati piani. Per cui i raggi rappresentano le traiettorie perpendicolari al fronte d'onda piano incidente nel sistema.

## 4.2 Breve descrizione dell'ambiente di lavoro di ZEMAX

Vediamo le principali tabelle e i grafici che andremo ad analizzare e utilizzare nel nostro studio.

Surf>Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
STO	Standard	Infinity	0.000000		0.000000	0.000000
IMA	Standard	Infinity	-		0.000000	0.000000

Figura 4.2: tabella principale

In questa tabella vengono inseriti i parametri necessari al software per creare il layout del sistema e tutti i vari grafici. Vediamo una breve descrizione dei campi principali:

1. **Surf:Type:** è la colonna che indica le varie superfici del nostro sistema. Con la dicitura "OBJ" si indica la superficie oggetto del sistema, con "STO" oppure "1,2,3,..." si indicano tutte le superfici del sistema come specchi, lenti, ecc, ed infine con "IMA" si indica la superficie immagine del sistema.
2. **Radius:** è la colonna dove si vanno ad inserire i raggi di curvatura delle varie superfici. Quando si trova la dicitura "Infinity" significa che la superficie in questione è un piano, ovvero una superficie sferica di raggio infinito.
3. **Thickness:** è la colonna dove vengono inseriti i valori di distanza tra le varie superfici. Valori positivi indicano che la successiva superficie si trova a destra rispetto a quella considerata, mentre valori negativi indicano che la posizione della successiva superficie si trova a sinistra di quella considerata.
4. **Semi-Diameter:** è la colonna dove sono indicati le dimensioni delle varie superfici del sistema. In generale ZEMAX lavora con superfici sferiche per cui con la dicitura Semi-Diameter si indica il raggio della larghezza massima che raggiunge l'oggetto.
5. **Conic:** è la colonna dove vengono indicate le costanti coniche delle varie superfici. In base al suo valore si capisce se la superficie in questione è sferica, parabolica, ellittica o iperbolica.

Nella finestra principale del programma ci sono tre icone molto importanti dove andare a definire alcuni dei parametri generali di tutto il sistema.

Cominciamo dal campo **WAV**, che sta per wavelenght, ovvero lunghezza d'onda della radiazione incidente, che lasciamo impostata sul valore di  $0.55\mu m$ ; poi c'è l'icona **FIE**, ovvero field data, che rappresenta il campo di vista del nostro sistema. Il campo di vista principale è il **campo 0** che prende in considerazione solo i raggi che incidono perpendicolarmente al sistema. Campi diversi dallo 0 rappresentano raggi che arrivano al sistema inclinati di un certo angolo rispetto alla normale; ed infine il campo **GEN**, che stà per general, dal quale è possibile andare ad impostare diversi parametri. Quello che ci interessa è il valore del parametro dell'**Entrance Pupil Diameter**, ovvero il valore di diametro della superficie circolare che rappresenta l'apertura del sistema. Solo i raggi che passano all'interno di questa apertura arrivano ad incidere il sistema, tutti gli altri vengono "bloccati".



Figura 4.3:

Il valore che andiamo ad impostare è  $D = 144mm$ .

### 4.3 Simulazione del Concentratore Fotovoltaico con campo di vista 0

Introdotti alcuni concetti generali di nomenclatura e sul software, cominciamo ad analizzare la simulazione del Concentratore Fotovoltaico andando a considerare, per ora, solo i raggi che incidono il sistema perpendicolarmente.

Surf: Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
1*	Standard	Infinity	100.000000		72.000000	0.000000
STO	Standard	-66.400000	-30.000000	MIRROR	72.000000	-1.000000
3	Standard	-39.700000 V	30.000000	MIRROR		-6.600000 V
IMA	Standard	Infinity	-			0.000000

Figura 4.4: tabella 1

Per prima cosa studiamo la tabella di Figura 4.4, che riguarda la prima simulazione eseguita col software. Alcuni parametri del sistema (quelli cerchiati in rosso) rappresentano delle costanti che non cambieranno mai, dovute ai



parametri di vincolo del sistema e ad alcune impostazioni che abbiamo fissato nel software. I valori cerchiati in verde rappresentano i risultati ottenuti in teoria per la superficie primaria quindi  $R = 86.4mm$  e costante conica  $k = -1$ . I valori cerchiati in blu rappresentano le variabili che abbiamo impostato per eseguire **l'ottimizzazione del sistema**.

Quando ZEMAX esegue la funzione d'ottimizzazione, il risultato finale è un sistema con le migliori prestazioni, cioè caratterizzato da minimo spot sul piano immagine e minime aberrazioni di sistema.

In realtà nel nostro sistema non è rilevante avere uno spot che sia il più piccolo possibile, ma gli aspetti da considerare sono:

- tutti i raggi che entrano nel sistema devono essere focalizzati sulla cella, per cui su un'area di  $9mm^2$ ;
- la superficie secondaria deve essere la più piccola possibile per evitare zone d'ombra sul primario e ridurre al minimo il vignettamento del sistema.

Infatti nella tabella 4.4, dopo aver eseguito l'ottimizzazione automatica col software abbiamo modificato le variabili cercando di rispettare i nostri parametri di ottimizzazione.

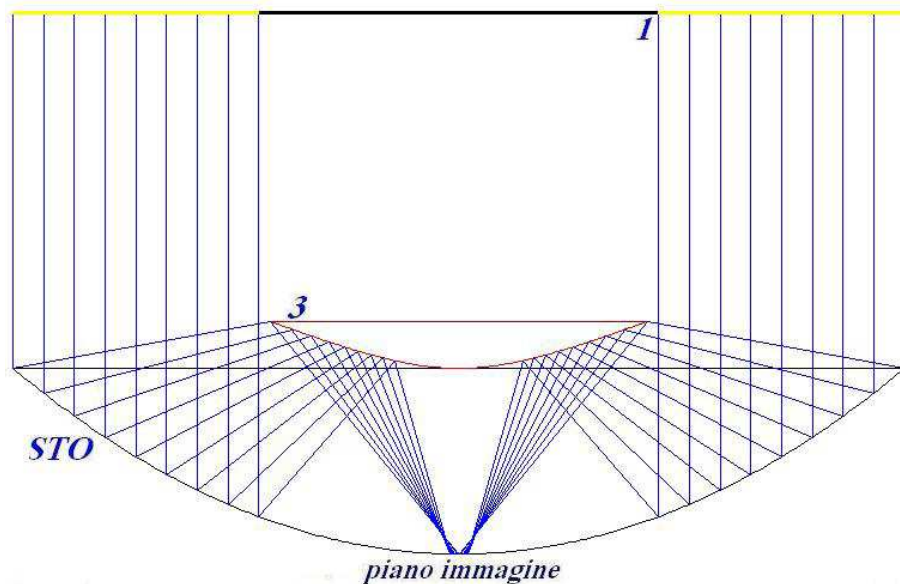


Figura 4.5: layout 1

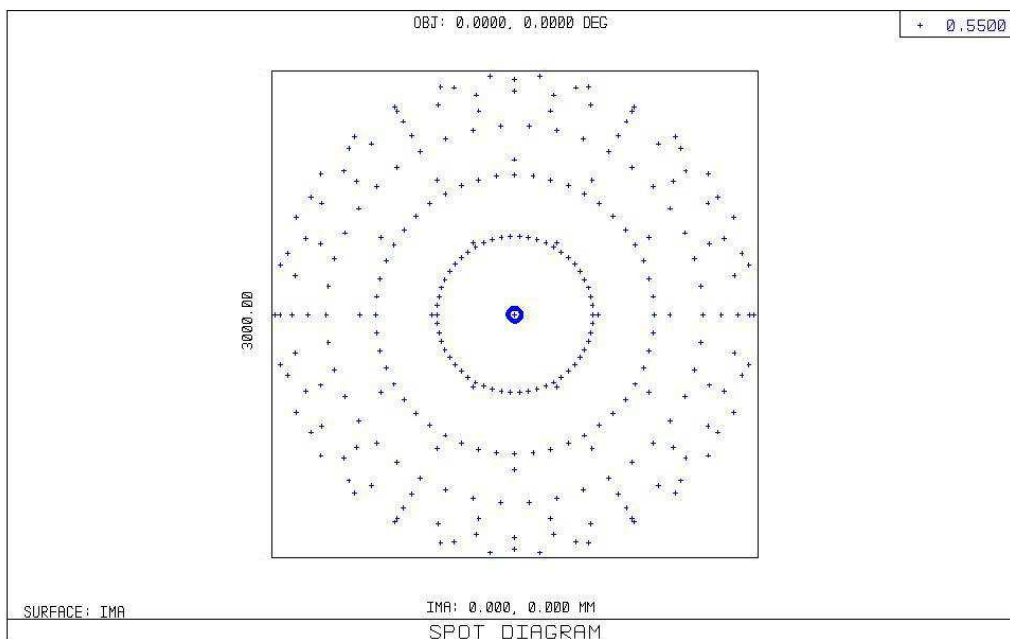


Figura 4.6: spot 1

In Figura 4.5 e 4.6 sono rappresentati rispettivamente il **layout** del disegno ottico e lo **spot diagram** sul piano immagine. Nello spot diagram è evidenziato un riquadro, che rappresenta il riferimento della cella fotovoltaica in modo da vedere se tutti i raggi "cascano" all'interno dell'area di  $9\text{mm}^2$ . Analizzando lo spot possiamo notare come abbiamo ottimizzato al massimo il sistema avendo focalizzato tutti i raggi nel piano immagine e distribuendoli in maniera omogenea su una circonferenza di diametro  $9\text{mm}^2$ .

Il sistema ottenuto, dal punto di vista del fattore di concentrazione, lascia molto a desiderare perchè la grandezza della superficie secondaria è eccessiva (circa due terzi della superficie del primario). Questo, crea una zona d'ombra sul primario che limita il rendimento dell'intero sistema.

Una possibilità per cercare di migliorare le prestazioni del sistema è quel-

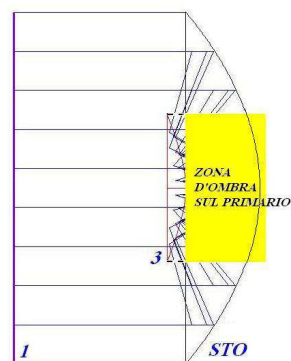


Figura 4.7: zona d'ombra

la di provare ad inserire come variabile anche il raggio del primario.

Infatti, il valore teorico di R è approssimativo perchè è stato calcolato ipotizzando il sistema in **ottica parassiale**. ZEMAX però, simula il sistema ottico reale formato da superfici estese e non limitate ad una piccola estensione nell'intorno dell'asse ottico. Di conseguenza, viene a mancare l'ipotesi per cui il raggio di curvatura della parabola sia approssimabile con quella della corrispondente superficie sferica.

Eseguiamo allora, una nuova ottimizzazione andando ad inserire anche il raggio di curvatura del primario come variabile per la funzione d'ottimizzazione. Otteniamo così i risultati rappresentati dalla tabella e dai grafici sottostanti.

Surf.Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.000000	0.000000
1*	Standard	Infinity	100.000000		72.000000	0.000000
STO	Standard	-75.700000 V	-30.000000	MIRROR	72.000000	-1.000000
3	Standard	-18.500000 V	30.000000	MIRROR		-3.250000 V
TMA	Standard	Infinity	-			0.000000

Figura 4.8: tabella 2

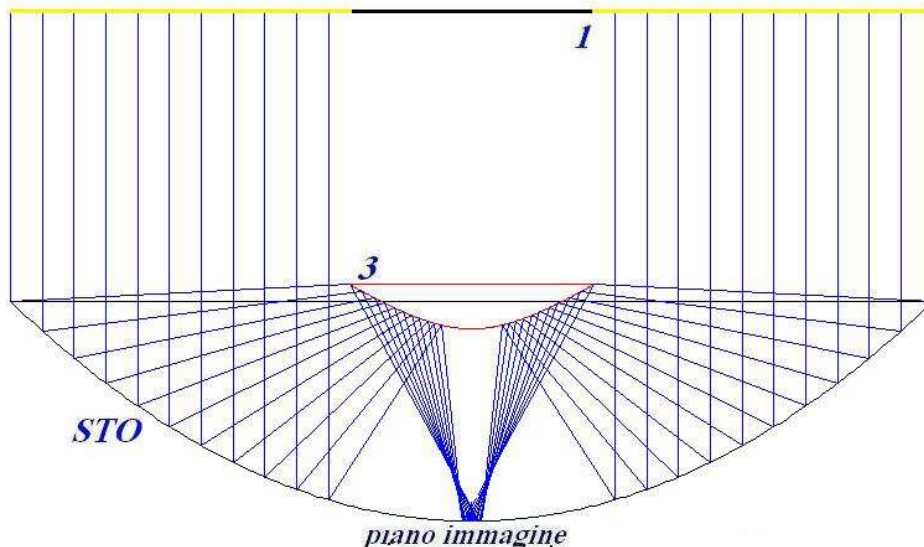


Figura 4.9: layout 2

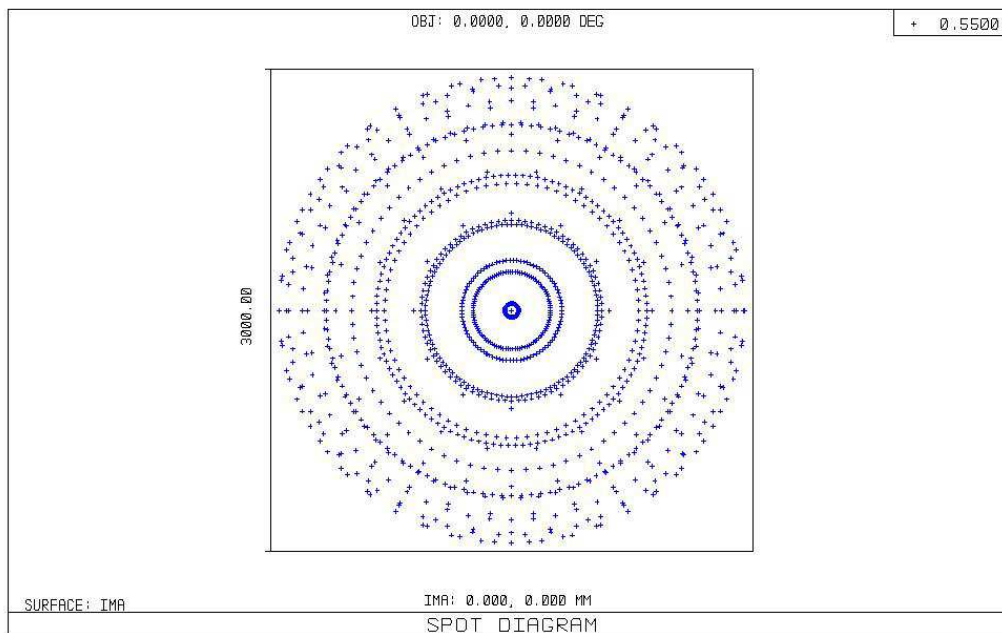


Figura 4.10: spot 2

Analizzando i risultati ottenuti possiamo notare come, a differenza della prima simulazione, la grandezza del secondario si sia quasi dimezzata (passando da un semi-diametro di  $31\text{mm}$  a  $19\text{mm}$ ), con la conseguente diminuzione della zona d'ombra.

I migliori risultati ottenuti nella simulazione con **campo di vista 0** sono:

1. specchio primario parabolico con raggio di curvatura  $R_1 = 75.7\text{mm}$  e costante conica  $k_1 = -1$ ;
2. specchio secondario iperbolico con raggio di curvatura  $R_2 = 18.5\text{mm}$  e costante conica  $k_2 = -3.25$ .

## 4.4 Simulazione del Concentratore Fotovoltaico con tutti i campi di vista

L'unica variabile che non è stata presa in considerazione nel paragrafo precedente, riguarda i raggi che incidono sul sistema inclinati rispetto alla normale. Dai parametri di vincolo è richiesto che il sistema sia in grado di gestire situazioni di disallineamento rispetto alla normale fino a  $2^\circ$ .

La prima simulazione che tentiamo, prevede l'utilizzo dei risultati finali ottenuti nel paragrafo precedente, andando ad inserire anche i raggi inclinati.

Guardando lo spot di Figura 4.11, possiamo notare come i raggi inclinati di  $2^\circ$  sono completamente esterni alla cella mentre i raggi inclinati di  $1^\circ$  risultano appena focalizzati, per cui è necessario eseguire una nuova ottimizzazione del sistema.

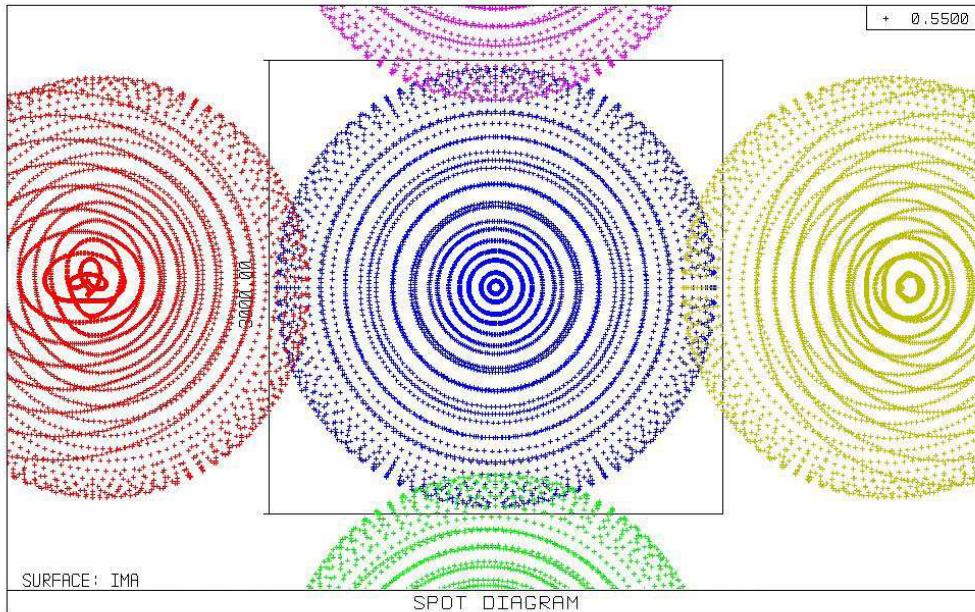


Figura 4.11: spot 3

Dallo spot diagram di Figura 4.11, possiamo notare che per ogni angolo d'inclinazione abbiamo rappresentato quattro spot. Infatti, andando a definire un sistema di assi cartesiani  $(xyz)$  sul sistema e indicando con  $z$  l'asse normale, si ha che i quattro spot rappresentano l'inclinazione destra e sinistra rispetto a  $z$ , lungo  $x$  e lungo  $y$ .

In questo caso, andando ad eseguire l'ottimizzazione, quello che vogliamo ottenere è un sistema difettato da minime aberrazioni e con spostamento del chief ray tale da garantire che i raggi entrino tutti nella cella.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

1. specchio primario parabolico con raggio di curvatura  $R_1 = 76.87mm$  e costante conica  $k_1 = -1$ ;
2. specchio secondario iperbolico con raggio di curvatura  $R_2 = 20.6mm$  e costante conica  $k_2 = -3.25$ .

Surf: Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.000000
1*	Standard	Infinity	100.000000		72.439621	0.000000
ST0	Standard	-76.800000 V	-30.000000	MIRROR	72.044303	-1.000000
3	Standard	-20.600000 V	30.000000	MIRROR	22.378425	-3.300000 V
IMA	Standard	Infinity	-		6.479632	0.000000

Figura 4.12: tabella 4

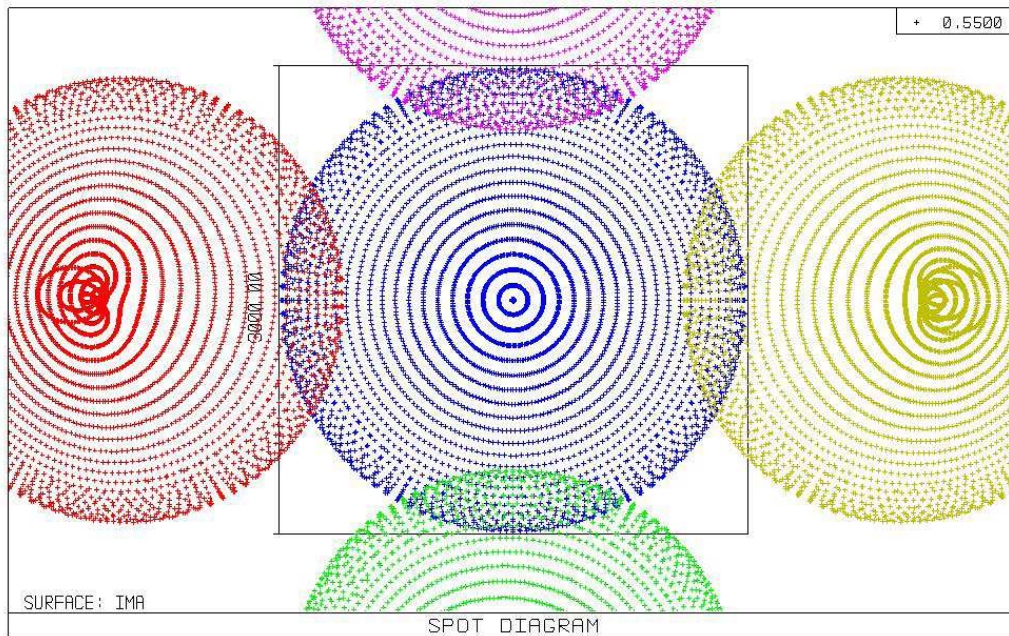


Figura 4.13: spot 4

Confrontando i risultati finali ottenuti nelle ultime due simulazioni possiamo concludere che per gestire anche i raggi inclinati rispetto alla normale abbiamo dovuto aumentare il raggio di curvatura del secondario con un piccolo aumento della zona d'ombra. Nonostante questo, siamo riusciti solo a far lambire sulla cella i raggi d'inclinazione di  $1^\circ$ , mentre quelli inclinati di  $2^\circ$  sono completamente fuori.

## 4.5 Analisi delle tolleranze

In questo paragrafo andiamo ad eseguire una breve analisi delle tolleranze dei parametri fondamentali di progetto. Il sistema ottico definitivo prevede due componenti ottici caratterizzati da due parametri fondamentali che sono: **il raggio di curvatura** e la **costante conica**. Con questo studio vogliamo individuare quali margini di errore sono concessi ai parametri nella fase realizzativa dei componenti ottici.

L'analisi verrà eseguita prendendo un parametro alla volta e andando a valutare qual è il massimo scostamento possibile rispetto al valore ideale, prendendo come riferimento lo spot diagram.

- VARIAZIONE DEL RAGGIO  $R_1$

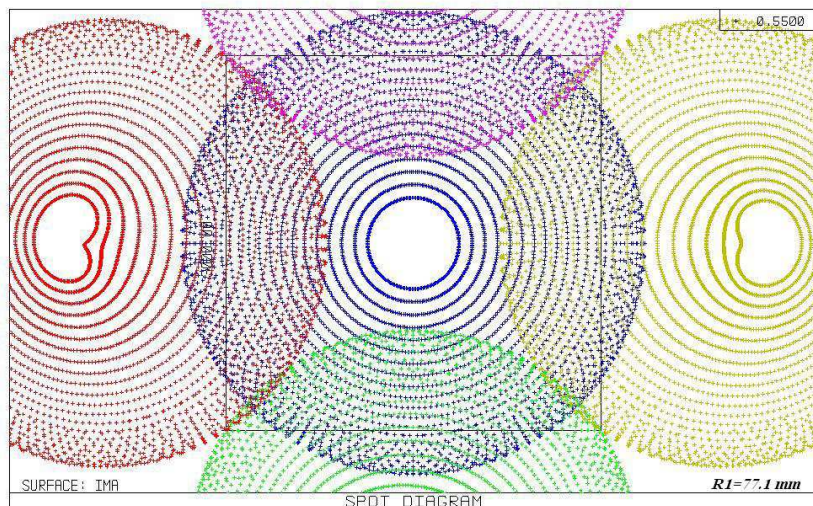


Figura 4.14: tolleranza massima raggio  $R_1$

Andando a variare il valore del raggio di curvatura del primario si nota che variazioni in difetto rispetto al valore ideale vanno a diminuire sempre di più l'illuminazione della cella solare, con conseguente diminuzione della superficie attiva alla conversione. Andando a variare il raggio di curvatura in eccesso, rispetto al valore ideale, si nota che una parte della radiazione proveniente dal campo di vista principale viene persa mentre aumenta la radiazione proveniente dal campo di vista inclinato di  $1^\circ$ . Il valore di variazione massima del raggio del primario è di  $77.1\text{mm}$  con uno scostamento dello  $0.3\%$  rispetto al valore ideale di  $76.87\text{mm}$ . In conclusione possiamo affermare che, il valore ideale del raggio di curvatura del primario deve essere leggermente più alto in modo da avere un margine di tolleranza anche in difetto.

- VARIAZIONE DEL RAGGIO  $R_2$

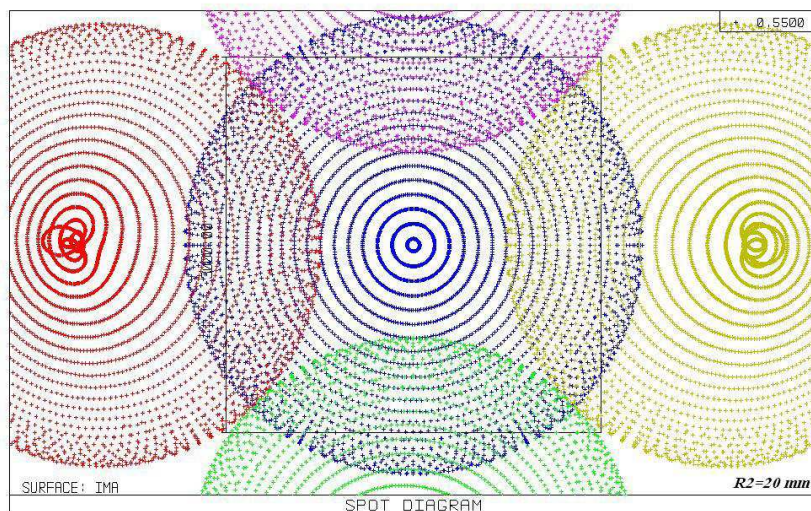


Figura 4.15: tolleranza massima raggio  $R_2$

Per il raggio di curvatura del secondario si nota che, variazioni in eccesso rispetto al valore ideale vanno a diminuire sempre di più l'illuminazione della cella solare mentre, con variazioni in difetto, il comportamento dello spot sulla cella è simile a quello del punto precedente, per cui con una perdita di radiazione del campo principale e un aumento della radiazione dei raggi inclinati di  $1^\circ$ . In questo caso però la variazione del raggio del secondario può essere maggiore rispetto a quella del primario. Infatti, tale valore può arrivare anche a  $20\text{mm}$  con una variazione del  $2.9\%$  rispetto al valore ideale. In conclusione il valore ideale da considerare deve essere più basso, in modo da consentire un margine di tolleranza anche per una variazione in eccesso.

- VARIAZIONE DELLA COSTANTE CONICA  $K_1$

La costante conica del primario è il parametro del sistema più delicato e ogni piccola variazione genera un aumento di difetti nel sistema. Un aumento del valore di  $k_1$  di qualche decimo non genera grosse variazioni della radiazione incidente, però aumenta il difetto dell'aberrazione di coma del sistema. Mentre al diminuire del valore della costante conica di qualche centesimo fa perdere un numero sempre maggiore di raggi, con una conseguente diminuzione del rendimento dell'intero sistema.

Possiamo affermare che una minima variazione di questo parametro crea effetti indesiderati nel sistema per cui la varianza dal valore ideale deve essere molto piccola, al massimo dell' $1\%$ .



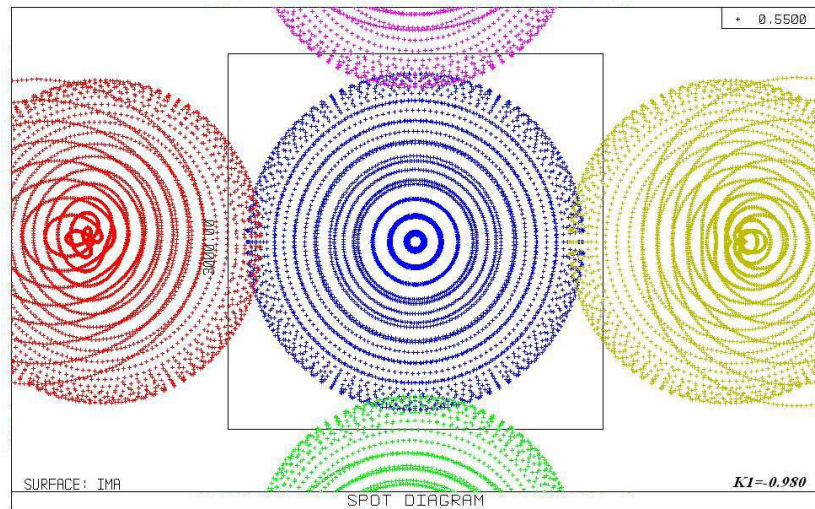


Figura 4.16: aumento dell'aberrazione di coma con l'aumentare di  $k_1$

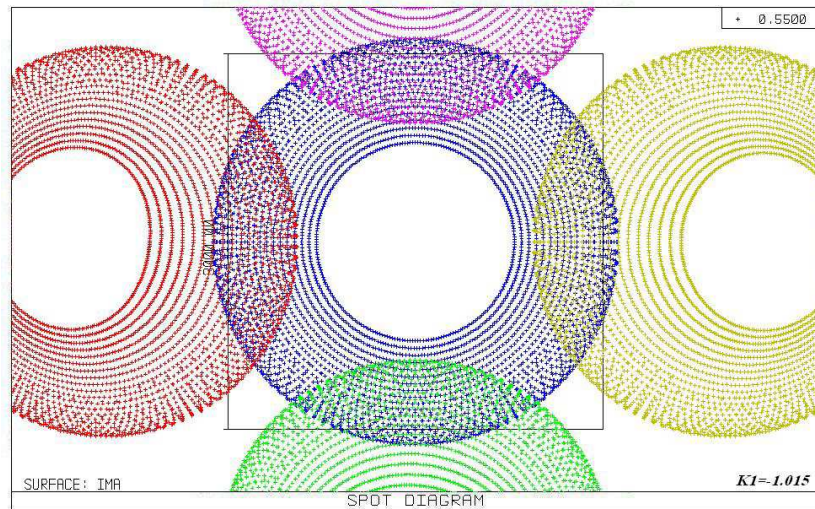


Figura 4.17: diminuzione del numero di raggi raccolti al diminuire di  $k_1$

- VARIAZIONE COSTANTE CONICA  $K_2$

La variazione della costante conica del secondario genera sul sistema gli stessi problemi visti nel caso precedente, però in maniera meno intensa. Possiamo considerare accettabile una variazione dal valore ideale di  $\pm 2\%$ .

Per avere un'idea di come degenera il comportamento dello spot al variare del valore di  $k_2$  abbiamo riportato due spot: il primo per una variazione in eccesso e il secondo per una variazione in difetto.

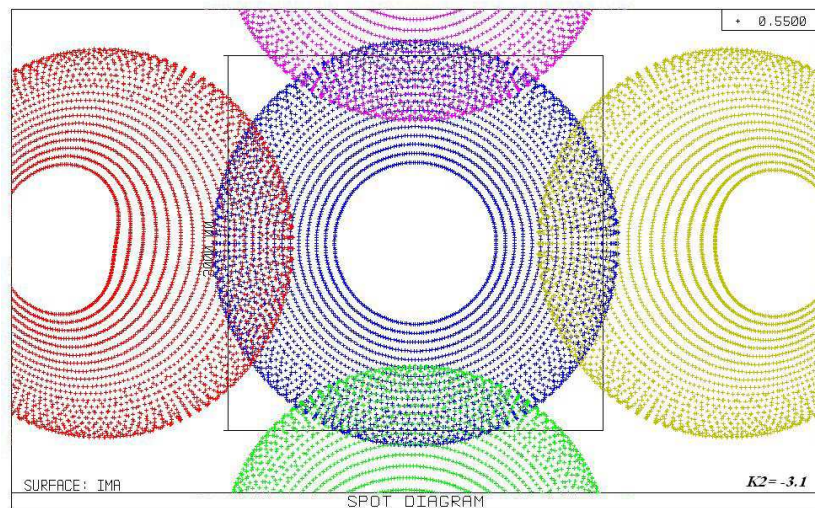


Figura 4.18: diminuzione del numero di raggi all'aumentare di  $k_2$

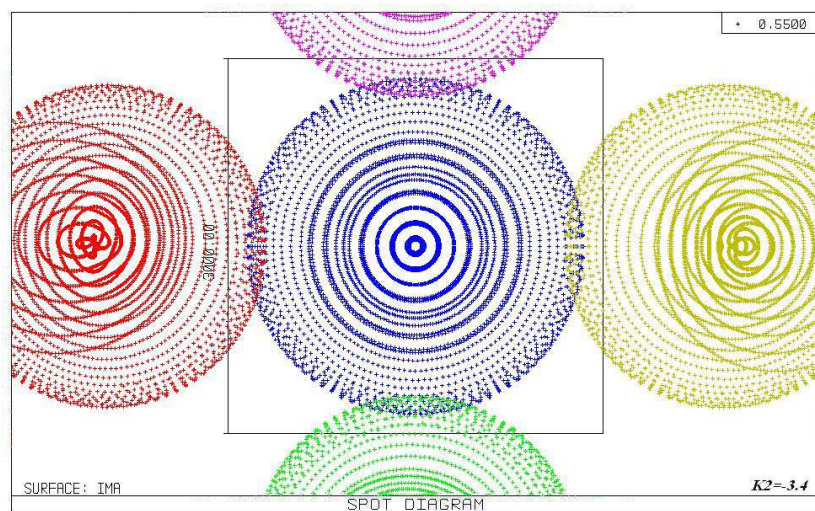


Figura 4.19: aumento dell'aberrazione di coma col diminuire di  $k_2$

# Capitolo 5

## Il componente ottico Mixer

Alla fine dell'analisi di simulazione, i moduli di Concentrazione proposti devono implementare i seguenti componenti ottici:

1. specchio primario parabolico con raggio di curvatura  $R_1 = 76.87mm$  e costante conica  $k_1 = -1$  con larghezza massima di 100 mm;
2. specchio secondario iperbolico con raggio di curvatura  $R_2 = 20.6mm$  e costante conica  $k_2 = -3.25$  distante 30mm dal primario con fuoco in corrispondenza del vertice del primario.

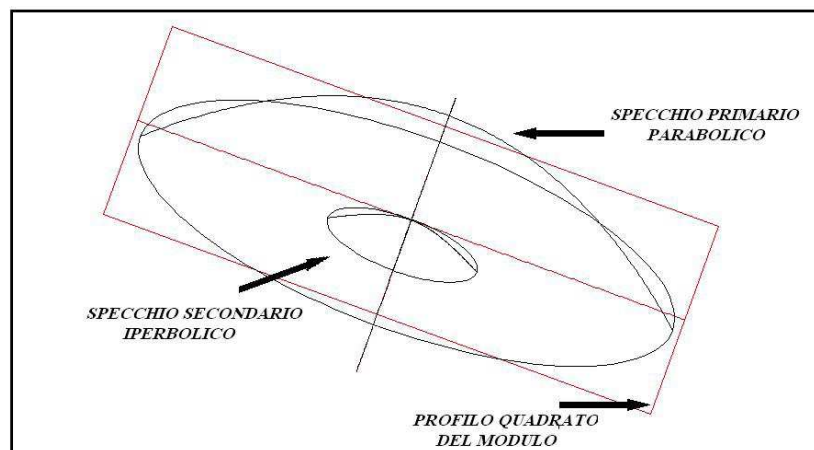


Figura 5.1: layout 3D dei componenti del sistema

Con questi parametri ottici le superfici sono compatibili con i parametri di vincolo geometrici del Concentratore.

Diversa è la situazione per quanto riguarda la gestione dei campi di vista.

Il sistema così com'è progettato non è in grado di gestire situazioni di disallineamento di  $2^\circ$  a causa delle ridotte dimensioni della cella fotovoltaica. Inoltre, la cella non è sfruttata al massimo a causa della distribuzione circolare della radiazione luminosa sulla sua superficie. L'ideale sarebbe avere una distribuzione uniforme della radiazione su tutta l'area quadrata della cella. Per risolvere tali inconvenienti bisogna progettare un'ulteriore componente ottico detto **Mixer**.

## 5.1 Dimensionamento preliminare del Mixer

Il Mixer è un particolare strumento ottico che è in grado di concentrare il flusso luminoso da un'area più grande a un'area più piccola, cambiandone contemporaneamente la forma.

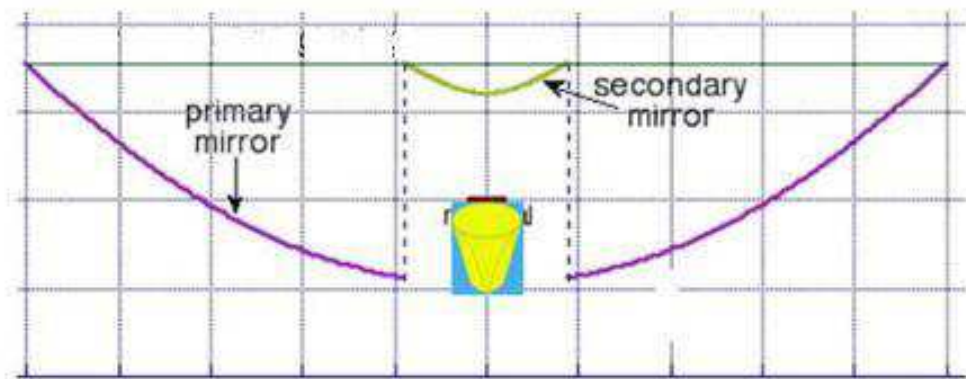


Figura 5.2: posizione mixer nel sistema

Il Mixer all'interno del Concentratore deve essere inserito a contatto con la cella fotovoltaica (Figura 5.2). Il suo funzionamento prevede di raccogliere tutta la radiazione, riflessa dallo specchio secondario, tramite una superficie d'ingresso circolare e grazie alla sua forma, di concentrare tale radiazione su una superficie d'uscita di dimensioni più piccole e di forma quadrata.

Nella figura 5.3 possiamo vedere la differenza tra la cella illuminata dal Concentratore senza l'utilizzo del Mixer (figura 5.3a) e la cella illuminata con l'utilizzo del Mixer (figura 5.3b).

Con l'utilizzo del Mixer la cella fotovoltaica è completamente illuminata dalla radiazione che incide sul sistema, per cui tutta la superficie sensibile è attivata per la trasformazione della radiazione luminosa in corrente elettrica.

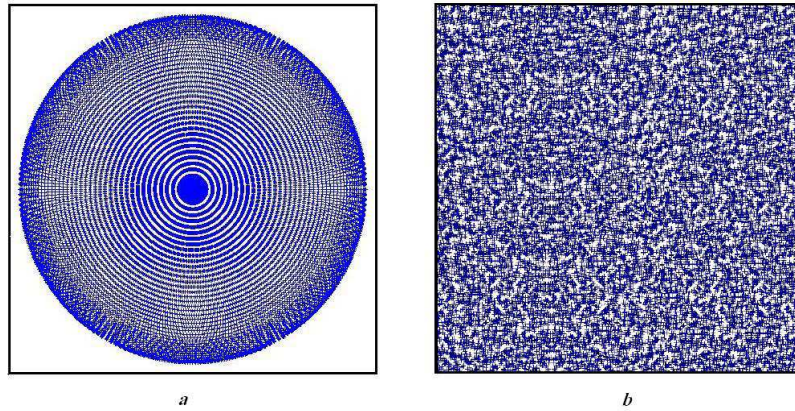


Figura 5.3: cella illuminata con campo di vista 0

I parametri geometrici fondamentali di un Mixer sono l'area della superficie d'ingresso, l'area della superficie d'uscita, la lunghezza  $L$  e gli angoli d'ingresso e d'uscita della radiazione luminosa. Per l'utilizzo del Mixer nel nostro Concentratore la superficie d'uscita è un parametro fissato che vale  $9\text{mm}^2$  (area della cella solare), mentre la superficie d'ingresso può variare in base all'altezza  $L$  del Mixer.

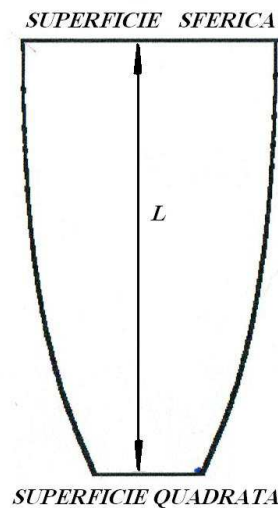


Figura 5.4: mixer

Prendiamo in considerazione il sistema illuminato con tutti i campi di vista fino a  $2^\circ$  d'inclinazione e andiamo ad individuare qual è il raggio che delimita la zona d'ombra da quella illuminata. L'intersezione di questo raggio con il flusso della radiazione riflessa dalla superficie secondaria determina l'altezza massima del Mixer nel sistema.

Come si può notare dalla figura 5.5, un'altezza del Mixer superiore ad  $L_{max}$  andrebbe ad intercettare una parte del flusso di radiazione riflesso dallo specchio primario, con una conseguente perdita di efficienza del sistema.

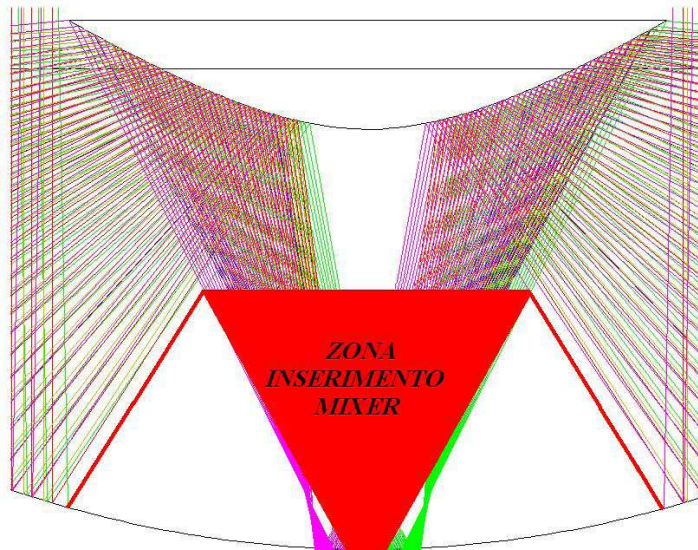


Figura 5.5: altezza massima del mixer

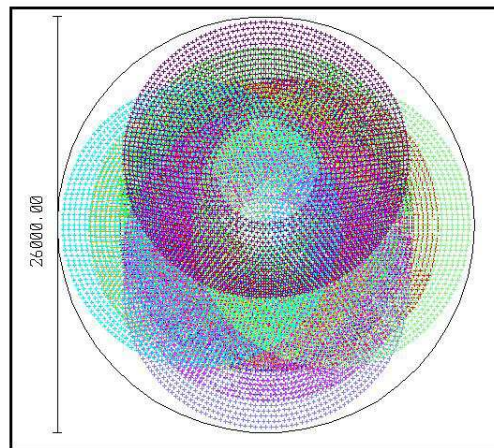


Figura 5.6: diametro massimo d'ingresso

In questo caso l'altezza massima del Mixer risulta  $L_{max} = 17mm$ , con un diametro massimo della superficie d'ingresso di  $26mm$ . In figura 5.6 possiamo notare come all'interno del diametro massimo cadono tutti gli spot dei campi di vista fino a  $2^\circ$ . Infine, l'angolo massimo d'ingresso in questa situazione è di circa  $30^\circ$ .

Riassumendo, l'eventuale progettazione e simulazione di questo componente, con gestione dei campi di vista fino a  $2^\circ$ , si deve basare sui seguenti parametri iniziali:

- superficie d'uscita quadrata di area  $9mm^2$ ;
- superficie d'ingresso circolare con diametro massimo di  $26mm$ ;
- angolo d'ingresso massimo di circa  $30^\circ$ ;
- altezza massima del Mixer di  $17mm$ .

# Capitolo 6

## Conclusioni

Alla fine di questo di questo progetto con i risultati emersi, sia dall'analisi teorica che da quella di simulazione, possiamo elencare i seguenti aspetti conclusivi.

1. E' stato progettato un Concentratore fotovoltaico con configurazione di tipo Cassegrain che rispetta i parametri geometrici di dimensionamento richiesti.
2. Rispetto al vincolo di progetto, che prevedeva di gestire situazioni di disallineamento rispetto alla normale fino a  $2^\circ$ , abbiamo constatato che non è possibile soddisfare tale vincolo contenendo lo sbandieramento del chief ray all'interno della cella solare. Sarebbe opportuno utilizzare celle di dimensioni più grandi, ad esempio con area pari a  $1\text{cm}^2$ , che permettono di concentrare tutti i campi di vista.
3. Bisogna analizzare e simulare in maniera più approfondita il componente ottico Mixer, che è stato solo preliminarmente dimensionato. Nella fase di simulazione del Mixer si verificherà se grazie all'introduzione di questo elemento e' possibile modificare il progetto al fine di allargare il campo di raccolta del concentratore fino a  $2^\circ$ .
4. Un futuro studio teorico e di simulazione del componente ottico Mixer deve comunque rispettare i parametri limite messi in evidenza nel Capitolo 5.
5. L'analisi delle tolleranze ha riscontrato un discreto margine di variazione per i raggi di curvatura delle due superfici, mentre nel caso delle costanti coniche l'analisi ha evidenziato alcune criticità. Lo studio è stato effettuando cercando di preferire una buona efficienza del vignettamento di sistema rispetto alla minimizzazione delle aberrazioni.



Sarà necessario fare un'analisi più approfondita delle tolleranze tenendo conto di quali sono effettivamente i margini di realizzazione dei componenti nella fase realizzativa, aspetto che verrà chiarito dall'interazione con i costruttori.

# Bibliografia

- [1] Vincenzi, A. *Sistemi Fotovoltaici, impianti solari in conto energia*. Dario Flaccovio Editore, 2006.
- [2] Groppi, F. e Zuccaro, C. *Impianti solari fotovoltaici*. Editoriale Delfino, 2004
- [3] Rau, H. *Energia Solare. Tecniche nuove*, 1987
- [4] Mazzoldi, Nigro, Voci. *Elementi di Fisica-Onde*. EdiSES, 2006
- [5] Gordon, J.M. *Concentrator optics*. 2009
- [6] Landsberg, P.T *Theoretical limits of photovoltaic solar energy conversion*. World Climate e Energy event, 2002
- [7] Parretta, A. *Modelling of 3D-CPCs for concentrating photovoltaic system*. PV in Europe from PV Technology to energy solution, 2002