

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**ANALISI ENERGETICA E OTTICA DI UNA
FORNACE SOLARE IN FUNZIONE
DELL'APERTURA E DEL FATTORE DI
CONCENTRAZIONE**

Relatore:

Prof. Matteo Lombini

Correlatore:

Prof. Fausto Cortecchia

Presentata da:

Giovanni Bugli

Anno Accademico 2021/2022

Abstract

Il principale obiettivo del seguente elaborato è quello di fornire una spiegazione introduttiva sul funzionamento delle fornaci solari, implementare la progettazione di una di queste, concentrandosi specialmente sulla analisi ottica e meno su ciò che concerne la chimica del reattore. In particolare vengono analizzate le prestazioni della fornace andando a variare dimensione e forma dello specchio primario a parità di focale, ottenendo così un'analisi del dispositivo in funzione del fattore di concentrazione.

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduzione | 1 |
| 2 | Termodinamica di una fornace solare | 3 |
| 2.1 | Efficienza del dispositivo | 3 |
| 2.2 | Riflettanza, assorbanza e trasmittanza | 5 |
| 2.3 | Fattore di concentrazione di una fornace solare | 6 |
| 3 | Progettazione ottica | 7 |
| 3.1 | Caratteristiche del primario e posizionamento reattore | 7 |
| 3.2 | Immagine sul piano focale di sorgenti puntiformi ed estese | 9 |
| 3.3 | Analisi dell'immagine sul piano focale in funzione di C | 11 |
| 3.4 | PSF in funzione di D | 14 |
| 3.5 | Monolito parabolico con ostruzione | 16 |
| 4 | Analisi per aperture del sistema non circolari | 19 |
| 4.1 | Modalità sequenziale e non sequenziale | 19 |
| 4.2 | Segmentazione dell'apertura del sistema | 20 |
| 5 | Conclusioni | 24 |

Capitolo 1

Introduzione

Una delle più comuni risorse sulla superficie terrestre è la luce solare. Nonostante questo spesso non siamo portati a pensare questa come una soluzione al problema della crisi energetica, forse per la sua intangibilità, ben diversa da quella di tutti i carburanti di origine fossile. Nel nuovo millennio però si fa sempre più importante il problema dell'inquinamento e dell'esaurimento dei giacimenti di petrolio e gas naturale. Ecco quindi che la tecnologia dei concentratori solari si presenta come un altro metodo di produzione di energia, nonostante non possa soddisfare tutto il fabbisogno energetico. Questi impianti che incanalano la radiazione solare e la trasformano in energia pronta all'utilizzo della comunità non hanno alcun effetto nocivo sull'ambiente durante l'utilizzo, anche se i pannelli devono essere costruiti e smaltiti, cosa non sempre semplice. Recenti articoli stanno andando in questa direzione sviluppando anche reattori in grado di scomporre la CO_2 per produrre carburante naturale [1], processo che risulterebbe molto utile al combattimento all'inquinamento. In secondo luogo, poichè utilizzano come fonte da cui attingere energia il Sole, si tratta praticamente di una fonte infinita (almeno rispetto alla scala temporale degli esseri umani). Bisogna però sottolineare che il Sole non è una sorgente costante nel tempo, ma al contrario è presente solo per una parte della giornata, e inoltre l'intensità varia con il passare delle ore e in base alla latitudine. Come conseguenza ci saranno zone del pianeta più adatte alla cattura dei raggi solari e altre meno. Qualcuno potrebbe allora chiedersi come sia possibile trasportare l'energia solare da una parte all'altra del pianeta in modo da poter produrre in un luogo e distribuirlo in tutto il globo. Una possibile soluzione sta nella produzione di un carburante immagazzinabile [2]. Questi tipi di sostanze sono prodotte attraverso reazioni chimiche per le quali sono necessarie temperature dell'ordine del migliaio di gradi, che vengono ottenute proprio attraverso la concentrazione della radiazione solare su un'area limitata. Dispositivi che svolgono questa funzione sono di due tipi: le fornaci e le torri solari, e hanno proprio il compito di convertire l'energia da luminosa a chimica. Tali dispositivi sono quindi ben diversi dai pannelli fotovoltaici o solari, che trasformano l'energia del Sole nel primo caso in una corrente elettrica mentre nel secondo in calore per aumentare la temperatura dell'acqua. Inoltre in questo caso non si ha necessità di un fattore di concentrazione molto alto in quanto è praticamente sufficiente l'intensità luminosa solare per ottenere gli scopi

desiderati.

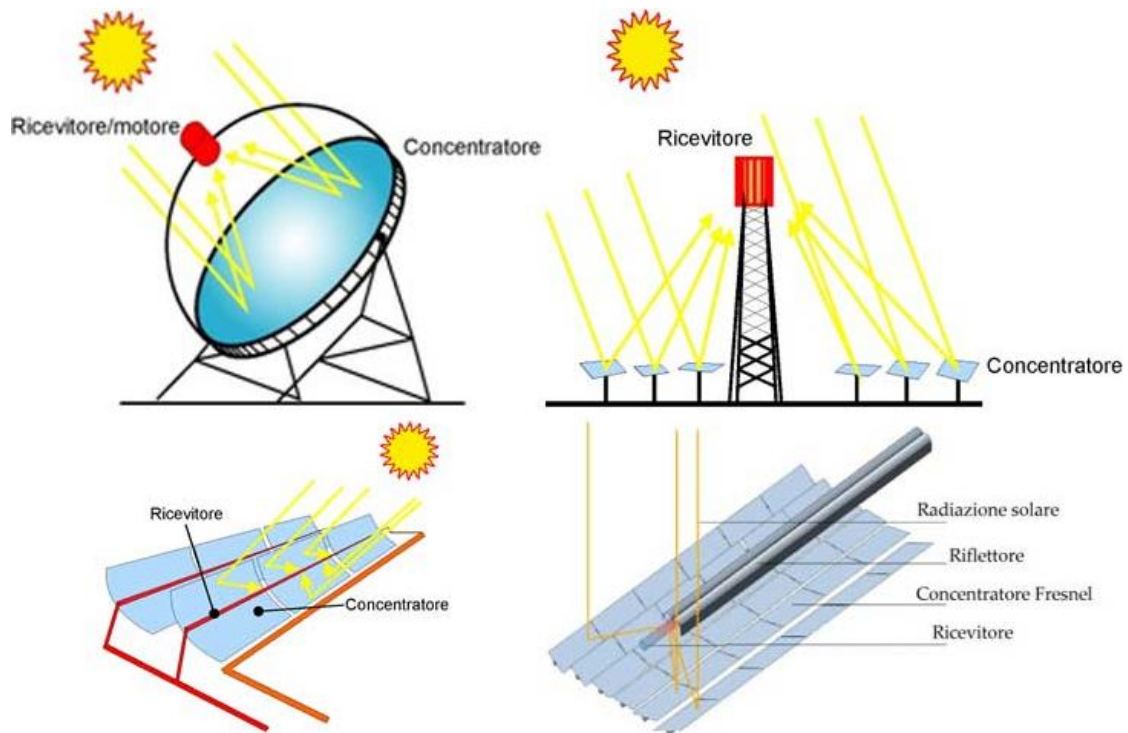


Figura 1.1: Tipi di concentratori solari esistenti. Partendo da in alto a sinistra una fornace solare, una torre solare, un concentratore solare a parabole lineari e un concentratore con collettori di Fresnel.

In Fig. 1.1 sono visibili alcuni dispositivi utilizzabili per la concentrazione della luce solare. Si possono distinguere in due tipi in base al numero di specchi utilizzati. Infatti la torre solare in alto a destra e il concentratore a collettori di Fresnel utilizzano molti specchi per concentrare la luce sul ricevitore, mentre i dispositivi visibili a sinistra nell'immagine utilizzano un unico specchio per ottenere questo scopo. Noi ci concentreremo sulla tipologia di fornace visibile in Fig. 1.1 in alto a sinistra.

Nella seguente trattazione andremo per prima cosa ad esaminare i principi termodinamici che governano la tecnologia delle fornaci solari mentre successivamente approcceremo allo studio dell'ottica del sistema per concludere con un focus sui tipi di aperture utilizzabili.

Capitolo 2

Termodinamica di una fornace solare

2.1 Efficienza del dispositivo

Ci potremmo chiedere che cosa ci sia in comune tra un motore a scoppio di un'automobile ed una fornace solare e la maggior parte delle persone risponderebbe niente, visto che il primo brucia carburante per generare il movimento delle ruote mentre il secondo produce energia dalla luce solare, il primo è rumoroso e inquinante, mentre il secondo no. Sorprendentemente però questi due oggetti hanno lo stesso scopo: trasformare l'energia che scorre attraverso di loro. In particolare è proprio il flusso di calore che guida questi due processi. Essendo due macchine termiche è possibile definire un parametro utile per farsi un'idea della bontà del nostro dispositivo: l'efficienza che indichiamo con η .

Possiamo quindi considerare la fornace come una macchina termica che lavora tra due termostati. Partiamo modellizzandola come una macchina di Carnot reversibile, alla quale corrisponde la massima efficienza possibile, prendendo come termostati la superficie del Sole e quella della Terra. In particolare la temperatura superficiale del Sole è $T_S \simeq 5800K$ mentre della Terra $T_T \simeq 300K$, da cui otteniamo

$$\eta_{thermo} = 1 - \frac{T_T}{T_S} \simeq 95\% \quad (2.1)$$

Nella realtà si è ben lontani da questi valori per svariati motivi tra cui le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali che compongono il dispositivo e le aberrazioni ottiche. Inoltre si ha anche il vincolo dovuto al Secondo principio della Termodinamica, che non ci permette di superare la temperatura superficiale del Sole all'interno del reattore della fornace in quanto se lo facessimo avremmo il passaggio di calore da un corpo più freddo ad uno più caldo.

In secondo luogo oltre all'efficienza di Carnot anche per una macchina ideale bisogna considerare le perdite dovute all'irraggiamento. Considerando la fornace come un corpo nero che scambia calore con l'esterno solo attraverso la radiazione termica e quindi senza calore perso per conduzione o convezione, si definisce un'efficienza di assorbimento che

ci indica quale frazione del calore che finisce all'interno della fornace non viene riemesso per irraggiamento, pari a

$$\eta_{ass} = 1 - \frac{\sigma \cdot T^4}{I_f} \quad (2.2)$$

dove σ indica la costante di Stefan-Boltzmann, mentre I_f il flusso di energia entrante all'interno del reattore della fornace.

Mettendo insieme questi due risultati possiamo ottenere un'efficienza complessiva di una macchina termica perfetta che è sia reversibile che isolata termicamente fatta eccezione per la sua radiazione di corpo nero [1]. Si ottiene così

$$\eta = \eta_{termo} \cdot \eta_{ass} \quad (2.3)$$

Notare che per ottenere l'efficienza complessiva abbiamo moltiplicato le singole efficienze perchè sono indipendenti l'una dall'altra. Da questa espressione è possibile andare a valutare la temperatura ottimale per la reazione andando ad imporre la condizione

$$\frac{\partial \eta}{\partial T} = T^5 - \frac{3}{4} T_T T^4 - \left(\frac{I_f T_T}{4\sigma} \right) = 0 \quad (2.4)$$

che può essere risolta numericamente e ci fornisce quindi un'indicazione sulla temperatura ottimale da tenere all'interno di una fornace. Tendenzialmente I_f varia da $2MW/m^2$ fino a $10MW/m^2$ che è un valore limite per una fornace. Risolvendo l'equazione si trova che T sarà pari a $1250K$ nel primo caso e $1600K$ nel secondo come visibile anche dalla Fig. 2.1 dove il massimo di efficienza è ben visibile per entrambe le curve. Sostituendo tali valori nell'Eq. (2.3) si ottiene nel primo caso un'efficienza del 71% mentre per $I_f = 10MW/m^2$ aumenta al 78%. Nonostante da questi semplici calcoli sembri conveniente aumentare il più possibile I_f per massimizzare l'efficienza del dispositivo, nel pratico è impossibile lavorare con concentrazioni così alte, senza contare i vari problemi legati all'ottica dello strumento.

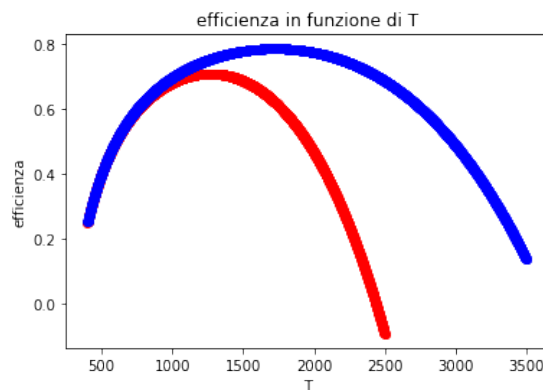


Figura 2.1: Efficienza della fornace in funzione della temperatura presente nel reattore. La linea rossa rappresenta il caso con $I_f = 2MW/m^2$, mentre quella blu $I_f = 10MW/m^2$.

2.2 Riflettanza, assorbanza e trasmittanza

Nella precedente trattazione abbiamo implicitamente considerato che tutta la luce che incide sulla superficie dello specchio primario della nostra fornace viene riflessa e indirizzata verso il reattore dove avviene la reazione. Nella realtà il processo è molto più complesso di così. Per cominciare consideriamo la radiazione solare che giunge attraverso l'atmosfera e prendiamo un valore medio dell'intensità per svolgere i nostri calcoli pari a $W = 1kW/m^2$. Lo scopo della fornace è quello di aumentare tale valore di circa tre ordini di grandezza per fare in modo di ottenere le temperature adatte alle reazioni chimiche volute. Quando però tale radiazione arriva sullo specchio primario del dispositivo una parte di luce viene riflessa, una parte assorbita e una parte trasmessa. Consideriamo la potenza definita come $P = IS$ dove I è l'intensità e S l'area. Nel nostro caso non si ha energia che passa attraverso lo specchio, quindi ci concentreremo sulle perdite causate dall'assorbimento dello specchio. Definiamo tre parametri che ci indicano le proprietà della superficie che stiamo trattando:

$$r = \frac{P_R}{P_i} \quad a = \frac{P_A}{P_i} \quad t = \frac{P_T}{P_i} \quad (2.5)$$

dove r è detta riflettanza, a assorbanza e t trasmittanza [3] ed esprimono rispettivamente la frazione di potenza che viene riflessa, assorbita e trasmessa dalla superficie. Poniamo $t = 0$ così da non considerare perdite dovute alla luce che passa attraverso. Al contrario per quanto riguarda r e a nel caso ideale di uno specchio avremmo $r = 1$ e $a = 0$, mentre nella realtà i materiali hanno valori più bassi di riflettanza e assorbanza maggiore di 0. Questo vuol dire che anche il nostro specchio primario si scalda assorbendo la radiazione solare, e questo può creare vari problemi per quanto riguarda la parte ottica. Infatti la variazione di temperatura è responsabile della dilatazione volumetrica che nel caso di una superficie ottica significa deformazione e quindi maggiore presenza di aberrazioni geometriche. In particolare ogni materiale è caratterizzato da un coefficiente di dilatazione termica definito come

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) \quad (2.6)$$

dove V indica il volume e T la temperatura, che ci indica quanto è sensibile alla variazione di temperatura. Tale parametro ha valori tipici per i materiali dell'ordine di $10^{-4}/10^{-5}$. Valori tipici di riflettanza di uno specchio sono dell'ordine di $r = 0.85$ ma si possono raggiungere valori più alti attraverso trattamenti specifici della superficie. Ciò significa che circa il 15% dell'energia in arrivo sullo specchio viene persa a causa dell'assorbimento.

2.3 Fattore di concentrazione di una fornace solare

Nella progettazione è di fondamentale importanza sapere di quanto si vuole aumentare l'intensità solare all'interno del reattore. Si ritiene quindi molto utile definire

$$C = \frac{I_f}{I_i} \quad (2.7)$$

dove I_f è l'intensità finale e I_i quella iniziale, che andiamo ad indicare con W e risulta pari a $1kW/m^2$. Nella pratica le fornaci solari hanno fattori che vanno da 2000 fino ad un massimo di 10000. Infatti sopra una data temperatura detta di stagnazione si ha che le perdite radiative sono uguali all'energia raccolta dal ricevitore [2]. Se imponiamo $\eta = 0$ nell' Eq. (2.3) e sostituiamo I_f con la sua espressione in funzione di C si ha

$$T_{stagnazione} = \sqrt[4]{\frac{CW}{\sigma}} \quad (2.8)$$

Se prendiamo $C = 2000$ otteniamo $T_{stagnazione} = 2437K$ mentre con $C = 10000$ si ha $T_{stagnazione} = 3644K$. Queste temperature sono molto distanti da quelle ottimali ricavate nel precedente paragrafo, quindi nella progettazione non si corre il rischio che la fornace raggiunga tali temperature se viene preparata per lavorare alla temperatura ottimale. Andiamo ora a esplicitare il calcolo di C . Se consideriamo uno specchio primario e un reattore di diametro D e d rispettivamente, allora avremo:

$$C = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (2.9)$$

da cui tenendo fisso il valore di d , per aumentare C è sufficiente incrementare il diametro del primario, che in altre parole significa l'energia raccolta. Se ora consideriamo però la riflettanza r del primario e che il reattore in una fornace si trova proprio di fronte al primario, allora questo schermerà una parte della luce in arrivo dal Sole, considerando il retro del reattore come una superficie perfettamente assorbente. Quindi avremo che il valore di C deve essere corretto se consideriamo l'ostruzione come circolare e con diametro pari a cd con c fattore di scala dell'ostruzione rispetto al reattore, allora avremo

$$C_{ostruzione} = r \cdot \left(\frac{D^2 - (cd)^2}{d^2}\right) = r \cdot (C_i - c^2) \quad (2.10)$$

Capitolo 3

Progettazione ottica

3.1 Caratteristiche del primario e posizionamento reattore

Nel precedente capitolo abbiamo trattato la parte energetica di una fornace solare, mentre ora ci focalizzeremo su quella ottica.

Per prima cosa bisogna scegliere la forma e il numero di specchi necessari per concentrare la luce. Come vincolo di progetto prendiamo un apparato composto solo da uno specchio primario parabolico monolitico e fisso, che focalizza i raggi nel suo fuoco. Ora, se il Sole fosse un oggetto puntiforme, l'apparato fosse perfetto e trascurando la diffrazione, avremmo che tutti i raggi verrebbero concentrati in un solo punto, e questo potrebbe essere un problema poichè comunque è necessario avere una zona estesa di temperatura uniforme all'interno del reattore. Possiamo schematizzare il Sole come un cerchio luminoso nel cielo che spazza un angolo di $\alpha = 0.53^\circ$. Allora quando tali raggi in asse incidono su uno specchio parabolico perfetto di diametro D , angolo di rim Φ_{rim} , che non è altro che l'angolo compreso tra l'asse della parabola e l'estremo più esterno della nostra apertura e formano una figura di diametro d sul piano focale [4], avremo che

$$f = \frac{d \cos \Phi_{rim} (1 + \cos \Phi_{rim})}{\alpha} \quad (3.1)$$

Noi però non conosciamo Φ_{rim} , e ci è quindi comodo ricavarlo da

$$\frac{D}{f} = \sqrt[2]{\frac{1 - \cos \Phi_{rim}}{1 + \cos \Phi_{rim}}} \quad (3.2)$$

in questo modo abbiamo un sistema di due equazioni in due incognite, ossia f e Φ_{rim} , che può essere risolto così da avere tutti i parametri geometrici del nostro progetto. In particolare per la fornace prendiamo come vincolo un diametro del reattore che viene posizionato in corrispondenza del fuoco del primario $d = 60mm$ e partiamo con un fattore di concentrazione $C = 2000$. Da questi parametri ci ricaviamo $D = 2.683m$, $f = 6.232m$ e $\Phi_{rim} = 12.29^\circ$. In questo momento non consideriamo le perdite energetiche dovute all'ostruzione.

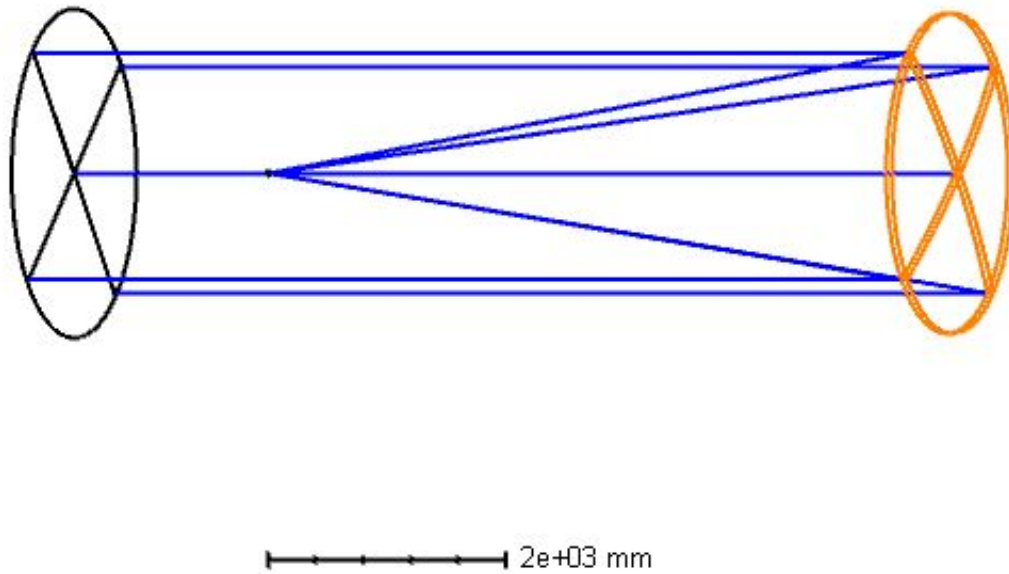


Figura 3.1: Layout della fornace solare realizzato con il software di ray tracing Zemax. La superficie nera non rappresenta alcuna superficie fisica ed è solo presente per fare da riferimento ai raggi. Quella arancione è lo specchio parabolico della fornace, mentre le linee blu sono tre raggi solari che vengono indirizzati nel fuoco della parabola arrivando in asse.

Per l'analisi della fornace ci avvaliamo di un programma apposito di ray tracing, Zemax Optic Studio[®]. In questo modo possiamo studiare tutte le proprietà ottiche del nostro sistema e valutarne eventuali debolezze. In Fig. 3.1 è visibile il layout della fornace nella sua configurazione più semplice e idealizzata, ossia senza ostruzioni e con un solo campo in asse. Per la realizzazione del progetto in Zemax è stata utilizzata la modalità sequenziale, che quindi sviluppa l'analisi tracciando i raggi da una superficie a quella successiva, senza curarsi della presenza di altri oggetti eventuali all'interno del percorso. Avendo un solo specchio parabolico, quest'ultimo funge sia da stop che da pupilla di entrata per il sistema ottico. L'energia totale raccolta dal primario può essere calcolata facilmente con la formula

$$P_{tot} = CW \cdot \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.3)$$

dove abbiamo considerato il materiale come perfettamente riflettente e trascurato le perdite radiative. Nel nostro caso si ottiene $P_{tot} \simeq 5.655kW$. Un ulteriore parametro utile alla valutazione di un sistema ottico è il $F_{\#} = f/D$, che spesso è utilizzato per capire la "velocità" dell'apparato. Otteniamo $F_{\#} = 2.35$, che ci indica una focale abbastanza lunga, a favore però di un Φ_{rim} relativamente piccolo, ossia uno specchio parabolico con una curvatura poco accentuata.

3.2 Immagine sul piano focale di sorgenti puntiformi ed estese

Passiamo ora alla visualizzazione dell'immagine di oggetti attraverso lo specchio primario sul piano focale. Iniziamo considerando delle sorgenti puntiformi a distanza infinita. Per svolgere tale analisi utilizziamo una specifica funzione di Zemax, ossia lo Standard Spot Diagram, che ci fornisce l'immagine di un oggetto puntiforme. Consideriamo il caso in asse, ma anche ad angolazioni diverse. Come campi fuori asse utilizziamo quattro campi che sono posti simmetricamente rispetto all'asse della parabola con un angolo di 0.265° , che è proprio metà della dimensione angolare del Sole. Possiamo così evidenziare le eventuali aberrazioni presenti che vanno a degradare l'immagine del Sole e quindi a peggiorare inevitabilmente l'efficienza al bordo della finestra di ingresso del reattore.

Se infatti, per quanto riguarda i campi in asse, le aberrazioni sono tutte nulle per un concentratore parabolico perfetto e quindi l'immagine sarà un punto geometrico, appena ci si discosta da tale condizione le cose cambiano. Per un'adeguata analisi delle aberrazioni presenti facciamo utilizzo di un utile strumento matematico: i polinomi di Zernike. Essi sono una base di polinomi ortogonali sul disco unitario e dal punto di vista pratico nell'ottica sono molto utilizzati in quanto permettono la scomposizione della degradazione di un'immagine in aberrazioni elementari ai vari ordini.

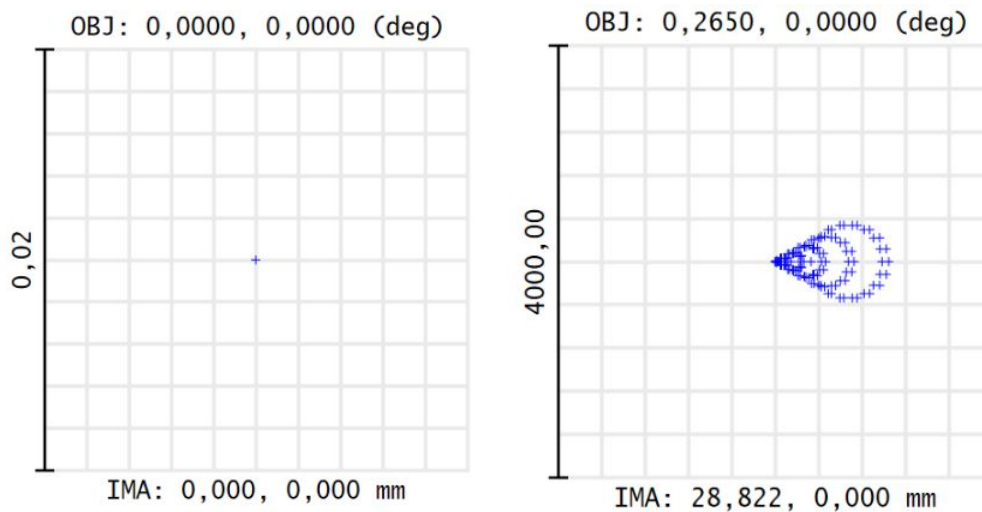


Figura 3.2: Standard spot diagram del campo in asse a sinistra e con un'angolo di 0.265° sull'asse orizzontale a destra. La barra verticale è indicata in μm . Le croci indicano il punto di arrivo dei raggi sul piano focale nella simulazione. Notare la diversa scala spaziale delle due immagini.

In questo caso in Fig. 3.2 riportiamo solo il campo in asse uno di quelli fuori asse in quanto per i restanti lo spot diagram è il medesimo se non per la direzione in cui vengono deviati i raggi. L'aberrazione in questo caso è evidente infatti i raggi non convergono tutti

nello stesso punto come avviene per il campo in asse, ed andando a calcolare i coefficienti dei polinomi di Zernike, si ha un'idea più chiara del tipo di aberrazione presente. Nel nostro caso i coefficienti più significativi nella scomposizione sono quelli relativi alla coma [5]. Questa tende a modificare lo spot diagram e a renderlo simile ad una cometa, da cui il suo nome, e come si vede in Fig. 3.2 il sistema ha proprio questo problema. L'espressione della coma è del tipo

$$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \sin(\theta) \quad \sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho) \cos(\theta) \quad (3.4)$$

dove ρ indica il raggio θ l'angolo di arrivo dei raggi. Nell'espressione la prima è la coma verticale mentre la seconda quella orizzontale. Passiamo adesso alla visualizzazione ed analisi di sorgenti estese, che è ciò che accade nella realtà dove non si ha mai a che fare con punti geometrici. Visualizziamo quindi l'immagine del Sole che si forma sul piano focale ponendo particolare attenzione ai valori di intensità raggiunti e alla distribuzione di tale parametro all'interno della finestra del reattore. Per fare ciò ci avvaliamo di una particolare funzione del software che ci permette di tracciare raggi da sorgenti estese: la Geometric Image Analysis.

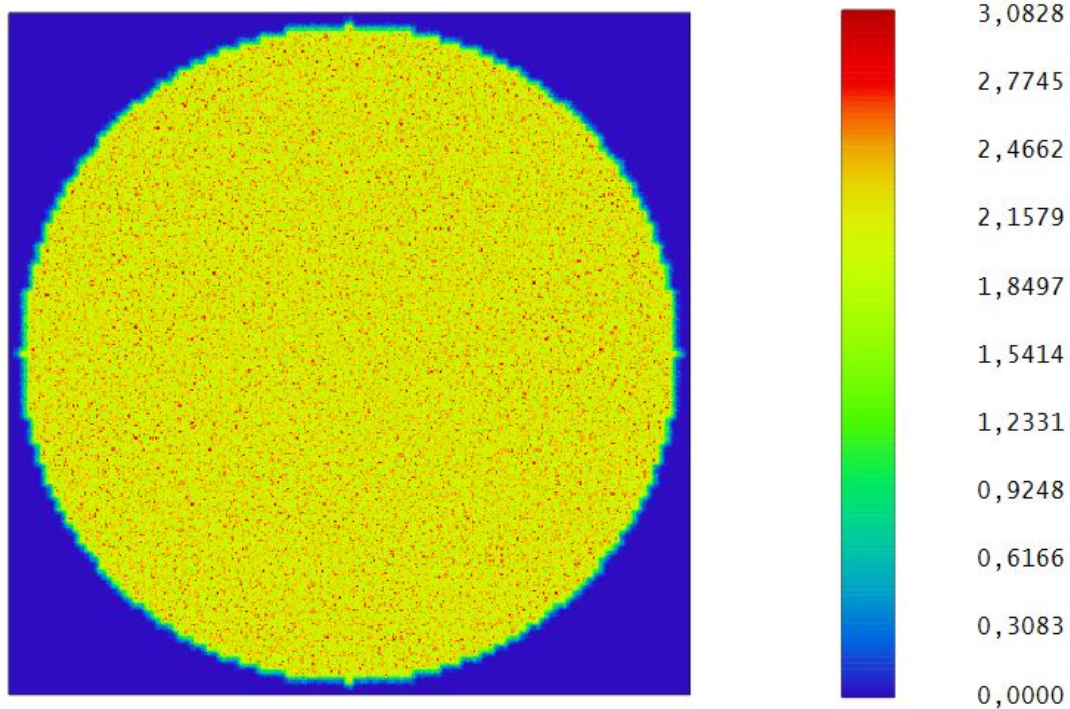


Figura 3.3: Immagine del Sole sul piano focale. Le fluttuazioni nell'immagine sono dovute al numero limitato di raggi utilizzati. Sia la scala orizzontale che verticale sono di 60mm. La scala dei colori a lato indica l'intensità della radiazione solare ed è espressa in W/mm^2 .

In Fig. 3.3 è visibile il risultato dell'analisi effettuata sul piano focale che coincide con la posizione del reattore. Si può notare che la distribuzione di intensità è praticamente

uniforme all'interno di un cerchio di diametro 60mm ed ha un valore di circa $2W/\text{mm}^2$ che corrisponde proprio a 2000 volte la concentrazione iniziale della radiazione solare. Al di fuori di questa zona l'intensità cala rapidamente a zero e il bordo del Sole è ben distinguibile e netto nell'immagine.

Questa analisi delle aberrazioni ci mostra che anche se un monolito parabolico in asse è perfetto, appena ci si discosta da questa condizione, sorgono vari problemi che degradano l'immagine e non sono facilmente risolvibili. Non solo, infatti si rischia anche di inviare una grossa quantità di luce al di fuori del reattore, che tende a scaldare tutta la struttura e ad alimentare tutti i problemi connessi alla dilatazione termica e la deformazione. Lo scopo del seguente paragrafo è quello di studiare le perdite di energia in funzione del diametro D del primario a parità di focale f e quindi in funzione di C . Dato che la coma è funzione dell'angolo di arrivo dei raggi rispetto all'asse, si può dedurre che all'aumentare del diametro la coma per il campo al bordo del Sole aumenta e quindi di conseguenza anche l'energia sulla finestra del reattore esce sempre in misura maggiore.

3.3 Analisi dell'immagine sul piano focale in funzione di C

La progettazione ottica elaborata finora ha considerato un fattore $C = 2000$, che per quanto riguarda le fornaci solari è il minimo richiesto per il raggiungimento di temperature adeguate. Ora però vogliamo implementare dispositivi con C maggiori, Per fare ciò, è sufficiente aumentare il diametro del primario lasciando inalterata sia la focale e quindi la curvatura dello specchio sia il diametro del reattore sul piano immagine. In particolare utilizzando Eq. (2.9) per vari valori di C si ottengono i valori riportati in Tabella 3.1.

| C | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 10000 |
|----------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| $D(\text{mm})$ | 3286.335 | 3794.733 | 4242.640 | 4647.580 | 6000 |

Tabella 3.1: Valori del diametro dello specchio primario in funzione del fattore di concentrazione C .

Per l'analisi sono stati usati dei valori di C a intervalli regolari, eccetto per l'ultimo che è 10000. Questo valore è stato posto come limite della fornace in quanto è molto difficile raggiungere tali valori di C , e per osservare l'effetto della coma di campo che si accentua sempre di più all'aumentare di D , e quindi di C .

Ovviamente nel cambiare il diametro del primario bisogna anche modificare la potenza totale incidente sullo specchio calcolata con Eq. (3.3) e visibile in Tabella 3.2.

| C | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 10000 |
|----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $P_{tot}(\text{kW})$ | 8.482 | 11.310 | 14.137 | 16.965 | 28.274 |

Tabella 3.2: Valori della potenza totale incidente sul primario in funzione del fattore di concentrazione C .

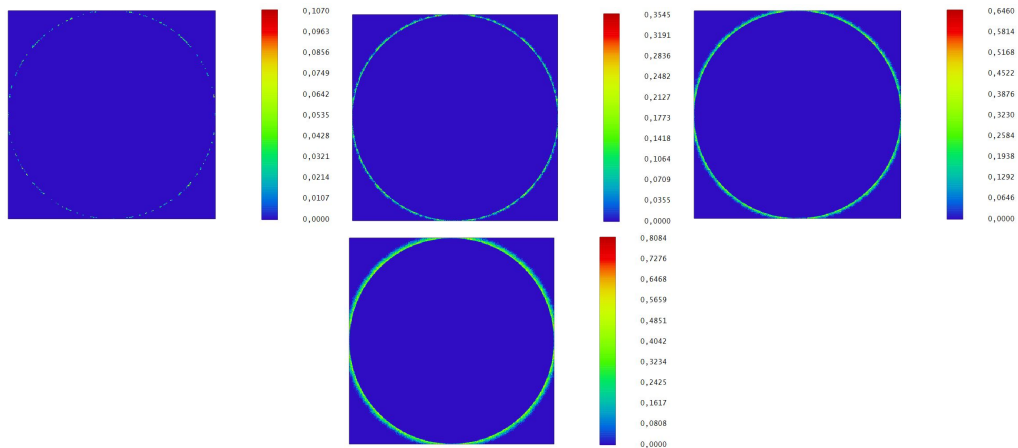


Figura 3.4: Immagine del Sole sul piano focale in funzione di C ottenuta andando ad aumentare D del primario. Sul piano focale è stata posta un'oscurazione di diametro pari alla finestra del reattore in modo tale da visualizzare l'energia persa a causa della coma. Rispettivamente partendo da in alto a sinistra $C = 3000, 4000, 5000, 6000$. La barra a destra indica l'intensità locale della radiazione ed è espressa in W/mm^2

In Fig. 3.4 sono riportate le Geometric Image Analysis di Zemax per quattro valori del fattore di concentrazione. Sul piano focale è stata posta un'oscurazione di diametro pari alla finestra del reattore in modo tale da evidenziare l'energia persa in ciascuna configurazione. Quello che si vede è che essa aumenta e tende sempre più ad uscire dal bordo del reattore all'aumentare di C . Ovviamente le scale verticali a lato sono diverse per ogni figura in quanto l'intensità sul piano finale cresce proporzionalmente al C . La conclusione che si può trarre è che è possibile aumentare la concentrazione della luce solare, ma al caro prezzo della definizione dell'immagine e quindi di perdite di energia al bordo del reattore con gli effetti già illustrati. Per valutare la quantità di luce che incide sul reattore di diametro $60mm$ utilizziamo un'altra funzione di Zemax ossia la Extended Source Encircled energy, che ci indica la percentuale di energia ad un dato raggio della finestra, che ci restituisce i valori in Tabella 3.3.

| C | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 10000 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Incidenza | 99.33 | 98.62 | 97.81 | 96.90 | 95.30 |

Tabella 3.3: Percentuale di raggi incidenti sul primario in funzione del fattore di concentrazione C .

Mentre per gli altri casi abbiamo visualizzato l'energia persa ovvero quella incidente al di fuori del cerchio del reattore, per il caso con $C = 10000$ vediamo l'immagine del Sole per comprendere l'effetto della coma che realmente si osserva.

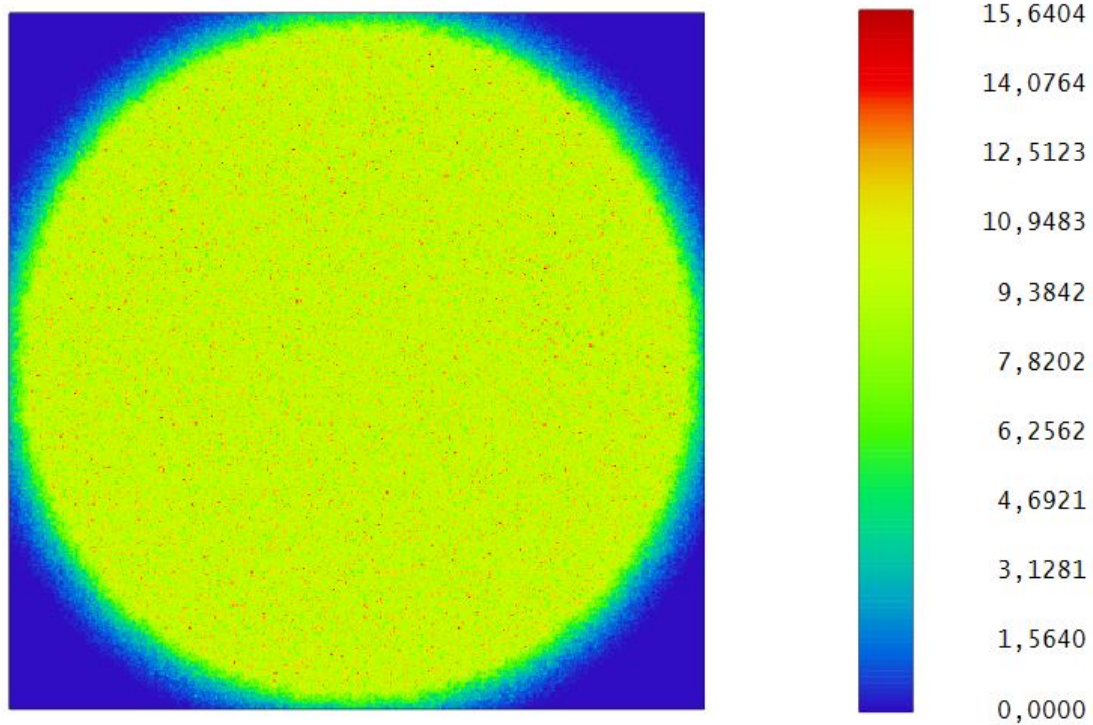


Figura 3.5: Immagine del Sole sul piano focale nel caso $C = 10000$. La barra a destra indica l'intensità locale della radiazione ed è espressa in W/mm^2

Nel caso di $C = 10000$ visibile in Fig. 3.5 l'effetto della coma di campo è evidente se la si confronta con il caso di partenza in Fig. 3.3. Infatti nel primo caso il bordo del Sole è ben definito e netto, mentre nella Fig. 3.5 i lati dell'immagine sono più sfumati a causa proprio della coma. Dalla Tabella 3.3 si vede che circa il 5% di energia viene persa che corrisponde a $1.4kW$. In realtà tale valore del fattore C è praticamente irraggiungibile in quanto le perdite radiative sono enormi. Oltretutto richiede anche un primario di dimensioni notevoli come visibile in Tabella 3.1.

Per visualizzare in modo più diretto questa aberrazione tipica del sistema che stiamo analizzando utilizziamo una specifica funzione di Zemax che ci permette di vedere l'effetto di una sola aberrazione che nel nostro caso sarà la coma primaria su tutto il campo di vista che ci interessa: il Full-Field Aberration che si può vedere in Fig. 3.6. Come si nota, appena ci si scosta dall'essere in asse, la coma tende a prendere il sopravvento e per angoli che coincidono con il bordo del Sole, l'effetto è molto ampio tanto da fare in modo che una parte della luce non entri nel reattore ed esca dal bordo.

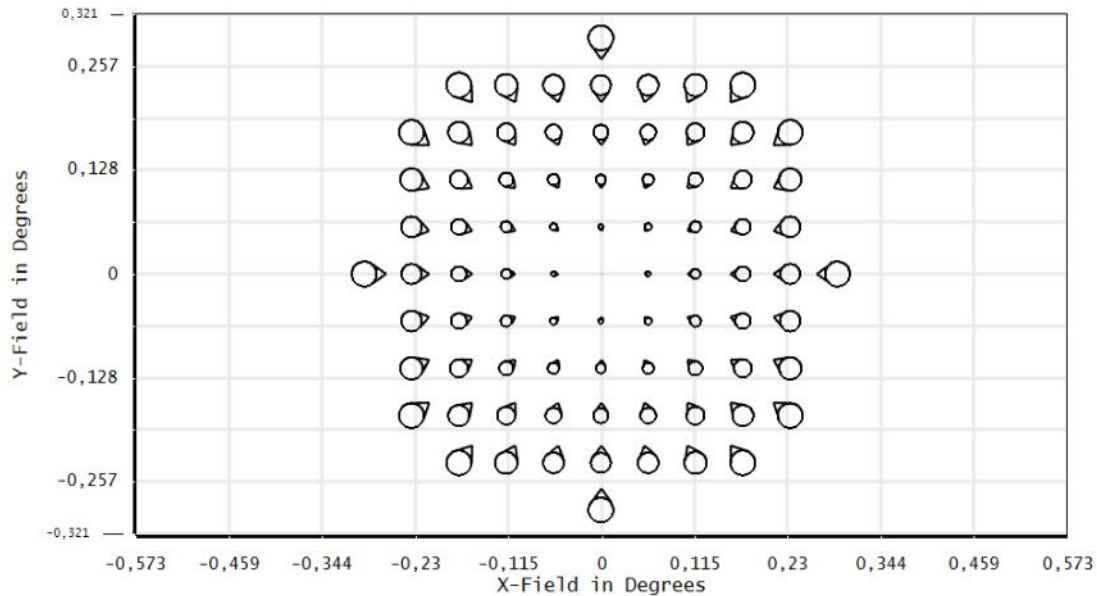


Figura 3.6: Full-Field Aberration del sistema nella configurazione anche con l'oscurazione. Gli assi orizzontale e verticale indicano l'angolo del campo di vista in gradi.

Ovviamente la coma non è l'unica aberrazione presente nel sistema quando si lavora fuori asse, ma se analizziamo i coefficienti dei polinomi di Zernike nel caso con un campo a $\theta = 0.265^\circ$, si osserva che la seconda aberrazione più importante, se si esclude il tilt, è data dal termine $Z_4 = \sqrt{3} \cdot (2\rho^2 - 1) = 0.77$ che corrisponde all'aberrazione sferica, ma che resta comunque di un ordine inferiore rispetto alla coma che invece ha un valore di circa 15. Alzando ulteriormente l'ordine dei polinomi si trovano altri coefficienti diversi da 0, ma la loro importanza è di gran lunga inferiore. Noi nella successiva trattazione ci concentreremo quindi sull'effetto di coma dato che è il più importante e con maggiori conseguenze.

3.4 PSF in funzione di D

Nella progettazione di un apparato ottico non basta considerare solo gli effetti dovuti all'ottica geometrica che concorrono alla buona concentrazione dei raggi. Bisogna tenere presente anche altri fattori importanti tra cui spicca la diffrazione. Essa definisce la massima risoluzione possibile dal nostro dispositivo al di sotto del quale non è possibile scendere per motivi fisici. Ad esempio nel caso del campo in asse visto con lo Standard Spot Diagram i raggi convergono in un punto geometrico. Questo fisicamente non può accadere a causa della diffrazione quindi è bene non saltare a conclusioni affrettate e considerare anche effetti fisici oltre che geometrici nell'analisi di un apparato ottico. In particolare per definire le proprietà diffrattive è utile visualizzare l'immagine di un punto posto all'infinito sul piano immagine. Questa condizione è detta di Fraunhofer, e

rispecchia perfettamente il caso a noi più utile ossia quello del Sole. Attraverso un'analisi analitica si trova che la figura di diffrazione in condizione di Fraunhofer è data dal modulo quadro della trasformata di Fourier della funzione apertura [3], che non è altro che una funzione che definisce il profilo dell'apertura del sistema ottico attraverso cui passano i raggi. In particolare il campo elettrico della luce in arrivo sul piano focale è dato da

$$\vec{E}(\vec{k}) = \int \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{A}(x, y) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r})} dydz \quad \text{con } \mathcal{A}(x, y) \text{ funzione apertura} \quad (3.5)$$

che non è altro che $\vec{E}(\vec{k}) = \mathcal{F}(\mathcal{A}(x, y))$. Poichè noi siamo interessati all'intensità della luce e non al campo, otteniamo proprio che il modulo quadro di tale espressione ci fornirà l'intensità in funzione delle coordinate sul piano immagine. Tale funzione è detta PSF che significa Point Spread Function. Un parametro importante per l'analisi della PSF è il raggio di Airy ossia il raggio corrispondente al primo minimo, che ci fornisce una misura della bontà della risoluzione angolare del sistema, mentre il rapporto tra i valori di intensità dei picchi della PSF del sistema e di una non aberrata ci fornisce il rapporto di Strehl che definisce la quantità di luce che non viene dispersa e incide nel centro della PSF. Nel caso della fornace presa da noi in esame, poichè nel campo in asse non ci sono aberrazioni, la PSF sarà coincidente con quella migliore possibile, però il raggio di Airy varierà con il fattore di concentrazione [6]. Infatti si ha che

$$R_{diff} = 1.22 \cdot \frac{\lambda f}{D} = 1.22 \cdot \lambda F_{\#} \quad (3.6)$$

da cui poichè D aumenta proporzionalmente al fattore C , si avrà che un'apertura maggiore avrà una dispersione minore. I risultati ottenuti sono visibili in Tabella 3.4.

| C | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 10000 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R_{diff}(\mu m)$ | 1.576 | 1.294 | 1.127 | 1.014 | 0.931 | 0.737 |

Tabella 3.4: Raggio di Airy in funzione del fattore di concentrazione C .

Un primo commento che si può fare osservando la Tabella 3.4 è sull'ordine di grandezza del raggio di Airy. Questo è infatti del μm , mentre come visto in precedenza la coma di campo ha effetti dell'ordine del mm , quindi ciò significa che l'effetto della diffrazione è trascurabile rispetto alle aberrazioni geometriche già viste. In secondo luogo, si vede che la PSF ha una grandezza spaziale inversamente proporzionale al diametro dello specchio primario. Questo effetto però rimane sempre piccolo nel nostro caso rispetto alla coma di campo che aumenta proporzionalmente a D e che quindi prevale sull'effetto diffrattivo come già visto in precedenza nella Geometric Analysis.

3.5 Monolito parabolico con ostruzione

Fino ad adesso abbiamo considerato una configurazione in cui la luce arriva dall'infinito su tutta la superficie del monolito parabolico. Nella realtà questa è un'approssimazione, infatti va considerata anche la presenza del reattore nel fuoco della parabola oltre a tutte le parti meccaniche che oscurano una parte della luce incidente come visibile in Fig. 3.7.



Figura 3.7: Modello di concentratore solare parabolico. Il reattore che si trova nel fuoco ha una grossa struttura meccanica che lo sostiene e che quindi oscura una parte di luce incidente.

Se consideriamo il reattore come totalmente assorbente, avremo che il fattore di concentrazione effettivo varia da quello calcolato in precedenza secondo l'Eq. (2.10). Nel nostro caso avendo un diametro di ingresso del reattore di $d = 60\text{mm}$ scegliamo come valore di diametro di ostruzione $c \cdot d = 100\text{mm}$, considerando anche la parte meccanica che circonda il reattore e che deve sostenerlo. Con questi dati si ottengono i valori riportati in Tabella 3.5.

| | | | | | |
|-------|------|------|------|------|-------|
| C_i | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 10000 |
| C_f | 2989 | 3989 | 4989 | 5989 | 9989 |

Tabella 3.5: Variazione del fattore di concentrazione dovuta alla presenza dell'ostruzione di diametro 100mm.

Ovviamente i valori di C non variano in modo drastico a causa dell'ostruzione, però comunque nel caso sia necessario raggiungere determinate temperature all'interno del

reattore è importante avere un valore preciso di concentrazione.

Questo problema è risolvibile andando ad aumentare il diametro dello specchio primario in modo da raccogliere più luce e "recuperare" quella persa a causa dell'assorbimento. I diametri vanno modificati applicando la formula

$$D_f = \sqrt{\frac{4\pi(P_{tot} + P_{ass})}{W}} \quad \text{con} \quad P_{ass} = \pi W d^2 \quad (3.7)$$

dove P_{ass} identifica la potenza assorbita dal reattore che viene quindi tolta al fascio. I valori sono visibili in Tabella 3.6.

| | | | | | |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $D_i(mm)$ | 3286.335 | 3794.733 | 4242.640 | 4647.580 | 6000.000 |
| $D_f(mm)$ | 3292.416 | 3800.000 | 4247.352 | 4651.881 | 6003.332 |

Tabella 3.6: Variazione del diametro dello specchio primario dovuta alla presenza dell'ostruzione di diametro 100mm.

Si nota che le variazioni di dimensione del dispositivo sono piccole, dell'ordine di pochi millimetri, ma comunque importanti per un corretto funzionamento. Anche per la simulazione di questo effetto oscurante è stato utilizzato Zemax, che ci ha permesso un'analisi dettagliata della configurazione.

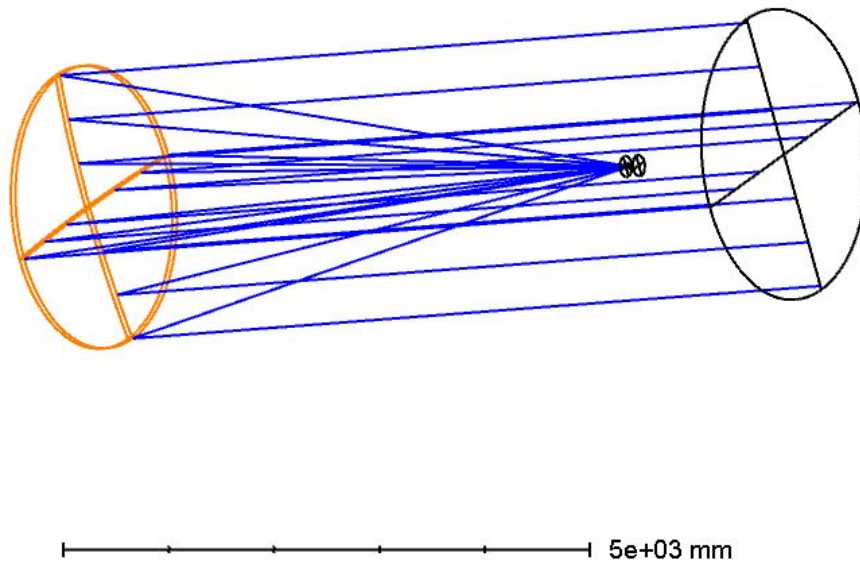


Figura 3.8: Layout della fornace solare realizzato con il software di ray tracing Zemax. Le due superfici presenti tra lo specchio e la prima superficie rappresentano il reattore e quindi l'ostruzione.

In Fig. 3.8 vediamo il layout dell'apparato ottenuto lasciando tutti i parametri di progettazione invariati come in Fig. 3.1 e sono solo state aggiunte due superfici assorbenti

di forma circolare che simulano l'effetto della presenza del reattore. Sono distanziate di $150mm$ l'una dall'altra in modo da dare anche una profondità all'oggetto. La più vicina è posta sul fuoco della parabola, mentre la seconda più indietro e simula il retro del reattore.

Passando ad un'analisi quantitativa sulle proprietà ottiche del dispositivo abbiamo che l'ostruzione non incide in alcun modo sullo Spot Diagram, e per quanto riguarda la diffrazione ha l'effetto di diminuire il rapporto di Strehl da 1 a 0.98. Ciò significa che una parte di luce si sposta dal picco centrale agli anelli più esterni. Tuttavia questo effetto è comunque molto piccolo e trascurabile rispetto a quello della coma di campo che domina nell'aberrazione dell'immagine.

Capitolo 4

Analisi per aperture del sistema non circolari

4.1 Modalità sequenziale e non sequenziale

Fino ad adesso abbiamo effettuato l'analisi del sistema utilizzando Zemax in una modalità detta sequenziale; ossia in cui i raggi vengono tracciati da una superficie alla successiva seguendo l'ordine in cui sono state scritte nel programma. Ora però vogliamo fare un passo ulteriore segmentando lo specchio, mediante l'introduzione di un elemento ottico non sequenziale. Questo può essere fatto in due modi nel programma: attraverso la creazione di un oggetto non sequenziale all'interno di un file sequenziale oppure in alternativa è possibile partire direttamente con un file interamente non sequenziale. Esaminiamo queste due casistiche una alla volta. Nel primo caso Zemax prevede la creazione di un ambiente non sequenziale in cui far propagare i raggi e ciò è svolto grazie alla presenza di due porte dette di entrata e uscita. Al loro interno il software si comporta in modalità non sequenziale, mentre al di fuori tratta le restanti superfici in modo sequenziale. Questo ci permette di creare un oggetto non sequenziale e di porlo tra le due porte. La seconda opzione invece prevede la creazione di un file che è interamente non sequenziale ed è quindi completamente differente. Questo implica una riscrittura completa di tutti gli oggetti presenti nel file sequenziale come oggetti non sequenziali, e quindi una maggior complicazione. In particolare vanno anche ridefinite le sorgenti di luce e il posizionamento del detector dei raggi, oltre al primario che deve essere creato a partire da una superficie senza alcuna proprietà. Il vantaggio della modalità non sequenziale di Zemax consiste nel maggior numero di tipi di oggetti creabili e nella loro versatilità. Permette inoltre un'analisi più accurata e "fisica" in quanto il programma quando traccia i raggi considera tutti gli oggetti presenti nel file e non solo il successivo come nella modalità sequenziale.

4.2 Segmentazione dell'apertura del sistema

Nella configurazione della fornace presa in esame l'apertura consiste in un paraboloido monolitico. Questo può risultare assai scomodo nel pratico poichè abbiamo visto che i diametri richiesti per raggiungere le concentrazioni volute si aggirano intorno ai $3 - 6m$. Fabbricare e trasportare oggetti di queste dimensioni assai fragili e delicati non è facile nè tantomeno economico. Quello che si può fare è quindi "spezzare" il primario monolitico in tanti pezzi più piccoli e maneggevoli. Questa procedura viene detta segmentazione ed molto usata in vari ambiti dell'ottica.

Consideriamo solo due diversi tipi di segmentazione del primario visto in precedenza: in esagoni e in cerchi. Il vantaggio degli esagoni è quello di permettere un perfetto incastro nel formare lo specchio iniziale. Questo non è vero con la configurazione a cerchi, ed è quindi necessario aumentare il diametro complessivo per compensare le perdite di luce a causa della geometria.

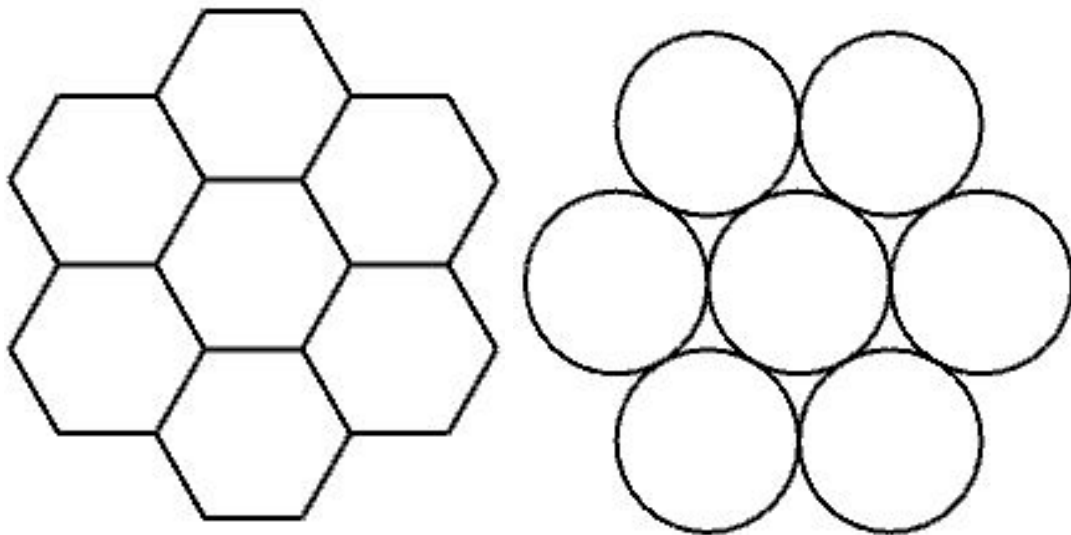


Figura 4.1: *Tipi di apertura considerati nella simulazione. A destra segmentazione tramite esagoni, mentre a sinistra con cerchi.*

In Fig. 4.1 possiamo vedere le due diverse configurazioni dell'apertura considerate. Dal punto di vista della progettazione, abbiamo creato nel file Zemax due file in cui abbiamo definito manualmente le aperture desiderate, che poi sono state inserite all'interno del layout. Notiamo che in entrambi i casi abbiamo segmentato lo specchio primario in sette specchi più piccoli. Si può anche lavorare con specchi ancora più piccoli andando ad aumentare gli anelli in cui segmentiamo. Questo si traduce nell'inserimento di un ulteriore anello che aumenta esponenzialmente il numero di specchi necessari per la segmentazione. Anche se l'analisi successiva è stata effettuata nella configurazione ad un anello, vogliamo in ogni caso mostrare un esempio di segmentazione con l'utilizzo di

una segmentazione a più anelli e riportiamo in Fig. 4.2 la configurazione a due anelli utilizzando gli esagoni.

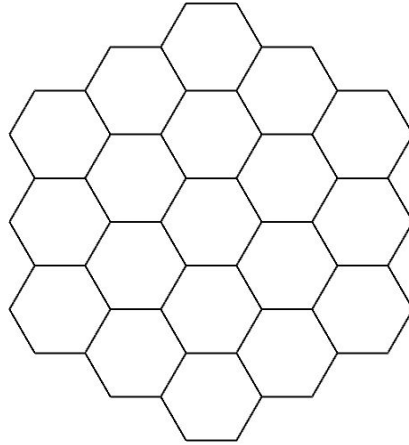


Figura 4.2: Apertura segmentata in configurazione a due anelli utilizzando esagoni.

Nel passaggio da un primario monolitico ad uno segmentato non è detto che la forma finale coincida con quella di partenza ed è quindi necessario riadattare le dimensioni dello specchio in modo tale che raccolga la quantità di luce desiderata. Questo vuol dire aumentare il diametro totale nel caso della segmentazione a cerchi, per recuperare la luce persa tra uno specchio e l'altro.

Visto che noi lavoriamo con specchi con Φ_{rim} piccoli, possiamo approssimare la loro superficie con un piano per avere un'idea delle dimensioni necessarie alla raccolta della luce desiderata con la segmentazione del primario. In particolare l'area di un esagono di lato l sarà

$$\mathcal{S} = \frac{3\sqrt{3}l^2}{2} \quad (4.1)$$

da cui per ottenere il lato necessario alla progettazione poniamo

$$P_{tot} = W \cdot N\mathcal{S} \quad (4.2)$$

dove N indica il numero di segmenti voluti che saranno sette nella configurazione ad un anello, mentre ad esempio diciannove nel caso a due anelli. Da questo ricaviamo

$$l = \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{9} \cdot \frac{P_{tot}}{NW}} \quad (4.3)$$

Il medesimo procedimento può essere effettuato nel caso dei cerchi andando a scrivere l'area in funzione del raggio $\mathcal{S} = \pi r^2$ e ricavando

$$r = \sqrt{\frac{P_{tot}}{\pi NW}} \quad (4.4)$$

Andando a sostituire i valori per le varie configurazioni che abbiamo considerato nei paragrafi precedenti si ottengono i valori visibili in Tabella 4.1

| C | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 10000 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| $l_{1anello}(mm)$ | 557.617 | 682.939 | 788.590 | 881.670 | 965.821 | 1246.870 |
| $l_{2anelli}(mm)$ | 338.461 | 414.528 | 478.656 | 535.154 | 586.231 | 756.821 |
| $r(mm)$ | 507.093 | 621.059 | 717.137 | 801.784 | 878.310 | 1133.893 |

Tabella 4.1: Lunghezza dei lati degli esagoni regolari in configurazione ad uno e due anelli, e dei raggi dei cerchi in cui viene segmentato lo specchio primario in funzione di C .

Per quanto riguarda la scrittura nel programma delle aperture risulta comodo fissare nel file una lunghezza per il lato degli esagoni e per il raggio dei cerchi e poi variare un fattore di scala per adattare l'apertura alla dimensione dello stop. In pratica questo significa porre $l = \alpha L$ e $r = \beta R$ dove L ed R sono fissati per tutte le configurazioni. Nel nostro caso abbiamo posto $L = 1000mm$ e $R = 1000mm$ da cui si ottengono i seguenti fattori di scala per le varie configurazioni come riportato in Tabella 4.2

| C | 2000 | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 | 10000 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha_{1anello}$ | 0.558 | 0.683 | 0.789 | 0.882 | 0.966 | 1.247 |
| $\alpha_{2anelli}$ | 0.338 | 0.415 | 0.479 | 0.535 | 0.586 | 0.757 |
| β | 0.507 | 0.621 | 0.717 | 0.802 | 0.878 | 1.134 |

Tabella 4.2: Fattore di scala in funzione di C .

Ovviamente il calcolo effettuato essendo una stima ottenuta approssimando lo specchio come un piano sarà sicuramente inferiore al valore reale, quindi per difetto. Sappiamo infatti che un paraboloide analiticamente si scrive come

$$f(x, y) = \gamma \cdot (x^2 + y^2) \quad (4.5)$$

dove $\gamma = 1/(4f)$ da cui se andiamo a calcolarci l'area della superficie con la formula

$$\iint \sqrt{1 + |\nabla f(x, y)|^2} dx dy \quad (4.6)$$

passando dalle coordinate cartesiane a quelle polari sostituendo $x = \rho \cos(\theta)$, $y = \rho \sin(\theta)$ e integrando si ottiene

$$\int_0^{2\pi} d\theta \cdot \int_0^{D/2} \rho \sqrt{1 + 4\gamma^2 \rho^2} d\rho = \frac{\pi}{6\gamma^2} \cdot [\sqrt{(1 + \gamma^2 D^2)^3} - 1] \quad (4.7)$$

Se andiamo a calcolarci i rapporti tra le aree calcolate in modo analitico e in modo approssimato, si ottengono dei valori prossimi all'unità. Ovviamente aumentando il diametro l'approssimazione tende a divenire meno accurata rispetto a distanze piccole dal

vertice del paraboloide. In ogni caso anche nel caso con $C = 10000$, si ha che il rapporto tra l'area approssimata e quella reale è del 99%, quindi si ha un errore massimo dell' 1%, il che ci dice che comunque l'approssimazione è abbastanza accurata.

Nonostante con uno specchio segmentato la coma di campo sia l'aberrazione che domina gli effetti ottici, come nel caso del monolito parabolico, per completezza e approfondimento notiamo che la sostituzione del monolito con uno specchio segmentato va a modificare alcune proprietà ottiche del sistema, tra cui quelle diffrattive. In particolare la PSF, dipendendo fortemente dalla forma dell'apertura del sistema, non avrà più una simmetria circolare, ma risentirà della forma del primario. Per svolgere tale analisi ci avvaliamo di una funzione di Zemax che ci permette di visualizzare la fase della luce diffratta. Il confronto tra la PSF con un'apertura a forma circolare oppure segmentata è visibile in Fig. 4.3.

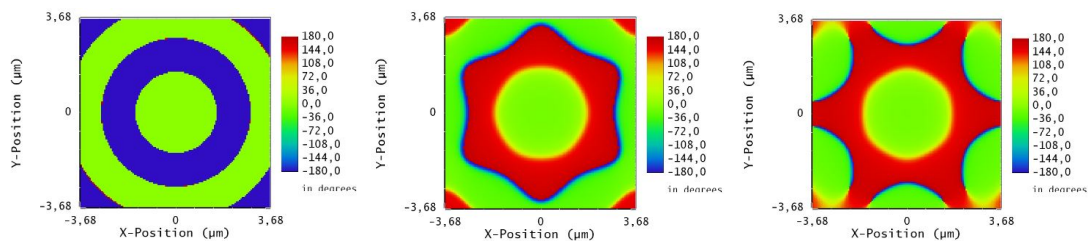


Figura 4.3: Fase della luce diffratta dal campo in asse in funzione dell'apertura del sistema. La barra verticale a lato indica l'angolo in gradi, mentre gli assi sono in μm . A partire da sinistra con un primario monolitico, con uno segmentato ad esagoni, ed a cerchi.

Nella nostra trattazione lavoriamo sempre con specchi che sono parte di un unico paraboloide, ma nella pratica si può agire in modo diverso. Visto infatti che la produzione di superfici asferiche presenta dei costi esorbitanti, quello che si cerca di fare solitamente è la progettazione di dispositivi utilizzando lenti sferiche. Esse hanno lo svantaggio di essere affette da molte più aberrazioni ed è quindi sconsigliabile sostituire un paraboloide monolitico con una sezione di sfera. Andando però a segmentare il paraboloide e sostituendo ogni segmento con uno specchio sferico opportunamente orientato e con la curvatura ottimizzata, è possibile raggiungere risultati notevoli. Ecco quindi che aumentare il numero di segmenti assume un significato ben preciso: quello di ridurre al minimo la differenza tra una superficie sferica ed una asferica, vale a dire lavorare nel limite di ottica parassiale, minimizzando la sagitta. Questo implica però un'ottimizzazione ben più complessa rispetto a quella effettuata sul monolito parabolico, in quanto deve essere compiuta per ogni specchio sferico, e anche dal punto di vista di Zemax, non è così scontato. Tale trattazione esula dagli obiettivi di questo elaborato e viene quindi lasciata a testi più avanzati.

Capitolo 5

Conclusioni

L'analisi svolta nei precedenti paragrafi ha portato ad alcuni interessanti risultati. In primis attraverso l'analisi dell'immagine in funzione di C si è visto come l'effetto della coma aumenti proporzionalmente al diametro del primario, e che tale effetto è senza dubbio quello che domina tra le aberrazioni della fornace, in cui si è osservato come la diffrazione risulti praticamente trascurabile. Inoltre si è visto anche come la presenza di un'ostruzione davanti al primario non incida in modo drastico nè sul fattore di concentrazione, nè tantomeno sulla PSF. Tuttavia è chiaro che gli argomenti trattati non sono che una minima parte di teoria e analisi necessaria allo sviluppo di una fornace solare reale funzionante ed efficiente. In primo luogo non sono stati presi minimamente in considerazione i processi chimici all'interno del reattore, la cinetica di reazione e tutta la parte di immagazzinamento di tale energia chimica. Inoltre la parte meccanica è stata trascurata nella progettazione, nonostante sia un aspetto di vitale importanza nella costruzione di dispositivi di questo tipo, soprattutto quando si ha a che fare con specchi di grandi dimensioni, che sono delicati e difficilmente trasportabili. Quello che possiamo dire con certezza è che sempre di più questi strumenti ricopriranno un ruolo fondamentale nella produzione di energia in modo efficiente e senza alcun impatto ambientale. Concludendo possiamo quindi affermare che questo settore è ricco di potenzialità e che nel futuro ci riserverà sempre più sorprese e risultati importanti per la nostra vita di tutti i giorni.

Ai miei genitori e mio fratello

Bibliografia

- [1] Y.T. Shah. *CO₂ Capture, Utilization, and Sequestration Strategies*. Sustainable Energy Strategies. CRC Press, 2021. ISBN: 9781000479768.
- [2] Aldo Steinfeld e Robert Palumbo. “Solar thermochemical process technology”. In: *Encyclopedia of physical science and technology* 15.1 (2001), pp. 237–56.
- [3] E. Hecht. *Optics*. Pearson Education, Incorporated, 2017. ISBN: 9780133977226.
- [4] P. Haueter, T. Seitz e A. Steinfeld. “A New High-Flux Solar Furnace for High-Temperature Thermochemical Research”. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 121.1 (feb. 1999), pp. 77–80. ISSN: 0199-6231. DOI: [10.1115/1.2888146](https://doi.org/10.1115/1.2888146).
- [5] J. Sasián. *Introduction to Aberrations in Optical Imaging Systems*. Cambridge University Press, 2013. ISBN: 9781107006331.
- [6] D.J. Schroeder. *Astronomical Optics*. Elsevier Science, 2012. ISBN: 9780323138567.