

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FERRARA**

**FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E  
NATURALI**

**Corso di Laurea in Tecnologie Fisiche Innovative**

**Modellazione ottica di un radiometro mobile per concentratori  
solari termodinamici con ricevitore cilindrico**

Relatore:

*Prof. Antonio Parretta*

Laureando:

*Stefano Tenan*

Correlatore:

*Dott. Marco Montecchi*

Anno Accademico 2010 – 2011

## INDICE

<b><u>CAPITOLO 1: INTRODUZIONE</u></b>	<b>4</b>
1.1 SITUAZIONE ENERGETICA ATTUALE	4
1.2 – TECNOLOGIA SOLARE TERMICA: LO STATO ATTUALE	9
1.2.1 – PRINCIPALI CARATTERISTICHE	9
1.2.2 – DESCRIZIONE DEL SISTEMA	10
1.3 – OGGETTO TESI E PUNTI ANALIZZATI	15
<b><u>CAPITOLO 2: CARATTERISTICHE DEL COLLETTORE SOLARE</u></b>	<b>17</b>
2.1 – CONFIGURAZIONE DEL COLLETTORE	17
2.2 – CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONCENTRAZIONE	20
2.3 – CARATTERISTICHE DEL SISTEMA RICEVITORE	23
2.4 - CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	26
<b><u>CAPITOLO 3: DESCRIZIONE SINTETICA DELLE FUNZIONALITÀ E DEGLI OBIETTIVI DELL'APPARECCHIO</u></b>	<b>31</b>
3.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	31
3.2 DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIO E SUE PARTI	39
3.3 MONTAGGIO DEL RADIOMETRO SUL COLLETTORE	43
<b><u>CAPITOLO 4: DESCRIZIONE DEGLI STRUMENTI UTILIZZATI PER LA MODELLAZIONE OTTICA</u></b>	<b>45</b>
4.1 TRACEPRO	45
4.2 DESCRIZIONE DELLA CREAZIONE DEL MODELLO DEL COLLETTORE	47
4.3 DESCRIZIONE DELLA CREAZIONE DEL MODELLO DEL RADIOMETRO	49
<b><u>CAPITOLO 5: STUDIO TEORICO DELLA DISTRIBUZIONE DEL FLUSSO SUL RICEVITORE PER UN FASCIO INCIDENTE COLLIMATO PERPENDICOLARE IN FUNZIONE DELL'ANGOLO D'INCIDENZA SUL FUOCO</u></b>	<b>51</b>

<b><u>CAPITOLO 6: MODELLAZIONE OTTICA DEL COLLETTORE IN ASSENZA DEL RADIOMETRO</u></b>	<b>56</b>
<b>6.1 CONFRONTO FRA ANDAMENTO DELLA DISTRIBUZIONE DEL FLUSSO TEORICO E SIMULATO SUL RICEVITORE</b>	<b>58</b>
<b>6.1 MODELLAZIONE OTTICA CON ANGOLO D'INCIDENZA DI 0°</b>	<b>62</b>
<b>6.2 RENDIMENTO CONCENTRATORE</b>	<b>70</b>
<b><u>CAPITOLO 7: MODELLAZIONE OTTICA DEL COLLETTORE IN PRESENZA DI UN CILINDRO VIRTUALE CHE SIMULA IL RADIOMETRO</u></b>	<b>77</b>
<b><u>CONCLUSIONI</u></b>	<b>81</b>
<b>RISULTATI RAGGIUNTI</b>	<b>81</b>
<b>ALLEGATI</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>83</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>84</b>

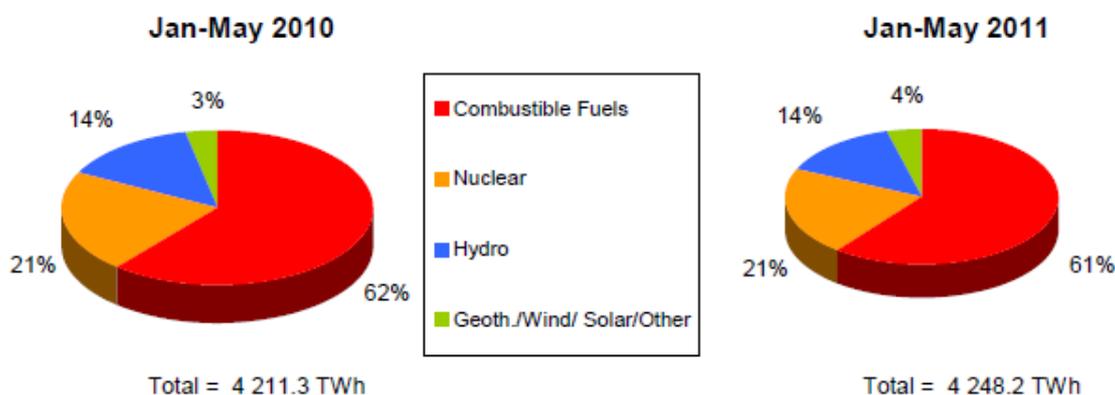
# Capitolo 1: Introduzione

## **1.1 Situazione energetica attuale**

La disponibilità energetica è stata sempre un'esigenza fondamentale della civiltà umana. L'energia è una delle basi dell'odierna società occidentale e di tutti i paesi in via di sviluppo, Cina e India in primo luogo. Il consumo energetico planetario è cresciuto stabilmente negli ultimi 150 anni ad un tasso costante pari a +2.3 % l'anno. Il consumo energetico dei vari paesi è direttamente correlato alla ricchezza prodotta.

Secondo i dati forniti dall' IEA (International Energy Agency) la produzione totale, per gli stati membri dell'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), nel periodo Gennaio – Maggio dell'anno 2011 è in media 4248.2 TWh.

La produzione di quest'energia è stata suddivisa a seconda della fonte energetica utilizzata per produrla, come mostrato nel grafico in Figura 1.1.



**Figura 1.1** - Diagrammi circolari di confronto di produzione da fonti energetiche tra periodi di diversi anni

Confrontando questi dati nello stesso periodo nell'anno precedente si evince che:

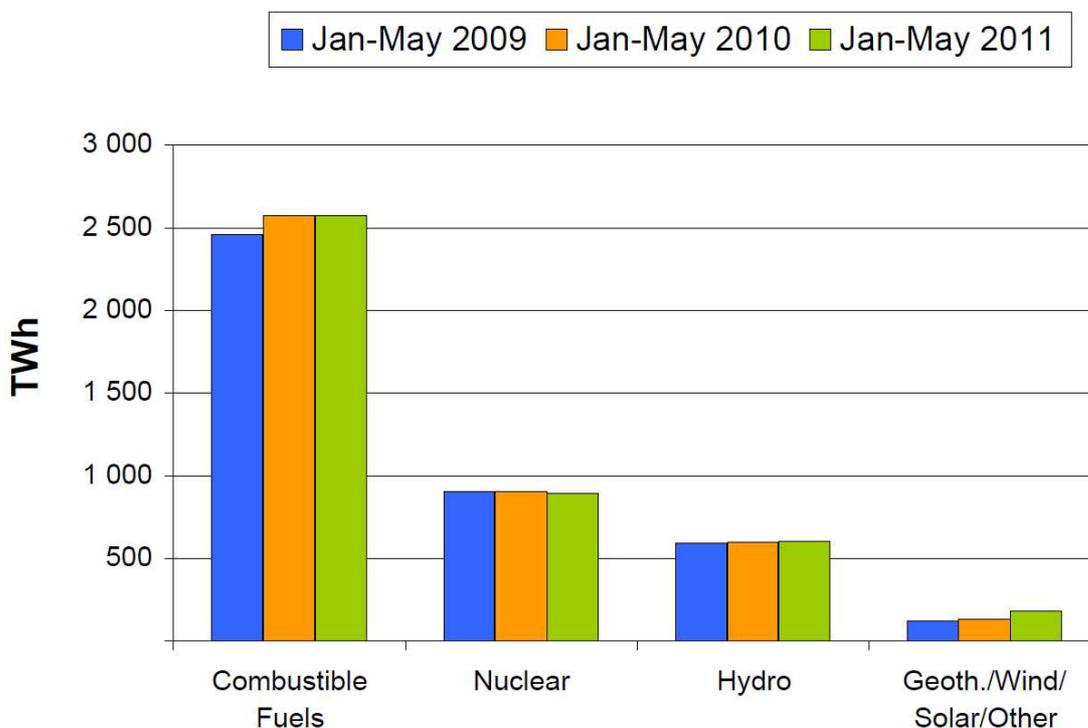
- la produzione totale è aumentata di 36.9 TWh, pari allo 0.9%;
- La produzione energetica da fonte geotermica, eolica, solare ed altro ha registrato la variazione percentuale più alta in confronto alle altre fonti energetiche, del 30.6% superiore;
- il Volume di scambi è incrementato del 15.6 TWh, pari al 4.7%.

Un panorama esaustivo del sistema energetico internazionale non può che prescindere dall'esame di tre principali questioni, tra loro interrelate: l'impatto in termini di emissioni di gas serra da usi

energetici, la sicurezza energetica per i paesi importatori ed esportatori e la sostenibilità economica del soddisfacimento del fabbisogno energetico.

L'analisi dei dati storici e degli scenari tendenziali sviluppati dall'International Energy Agency e dall'Energy Information Administration mostra come il sistema energetico internazionale si stia muovendo su un sentiero di sviluppo non sostenibile e come sia quindi necessario prevedere degli interventi di politica che favoriscano lo sviluppo di una vasta gamma di tecnologie energetiche innovative.

Il "World's Energy Outlook 2010" dell'IEA evidenzia che ben 1.6 miliardi di persone – un quarto della popolazione mondiale – sono oggi sprovviste di energia elettrica, il che preclude loro inevitabilmente lo sviluppo di una qualsiasi attività industriale e i relativi risvolti occupazionali. Circa 2.4 miliardi di persone fanno affidamento quasi esclusivamente sulle biomasse tradizionali come sorgente di energia primaria. La maggioranza (4/5) di queste popolazioni vive in aree rurali dei Paesi in via di sviluppo, principalmente in Asia e in Africa. Peraltro, in molti di questi Paesi, il livello di radiazione solare è considerevole e potrebbe quindi divenire per essi la fonte primaria di energia, naturalmente purché utilizzabile con tecnologie semplici ed a basso costo.



**Figura 1.2** – Istogramma di confronto di produzione da fonti energetiche tra periodi di diversi anni

L'IEA da tempo sottolinea come sia necessaria una rivoluzione energetica, basata sulla diffusione su scala mondiale di tecnologie a basso contenuto di carbonio. Questo processo, così come descritto dallo scenario di accelerazione tecnologica (BLUE Map) dell'Energy Technology Perspectives 2010 (ETP 2010), dovrebbe inizialmente comportare elevati costi di investimento, ma nel lungo termine dovrebbero essere più che compensati dai benefici ottenuti: in termini di riduzione degli effetti sul clima, miglioramento del livello di sicurezza energetica e di sostegno allo sviluppo economico.

Appare dunque doveroso per l'attuale società studiare nuove tecnologie per l'approvvigionamento energetico prima che l'esaurimento delle attuali fonti porti ad un collasso del sistema e che l'aspetto climatico risulti drammaticamente compromesso, con annesse tutte le note ripercussioni sull'uomo.

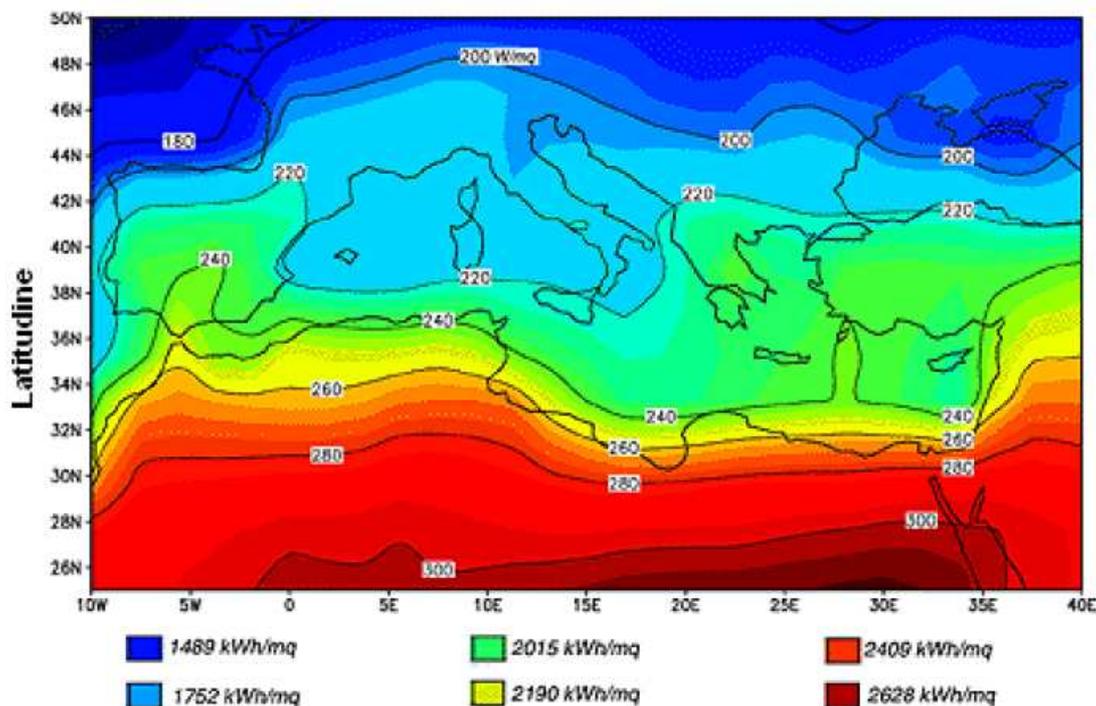
Allo stato attuale le principali direzioni nelle quali si può volgere lo sguardo sono:

- fusione nucleare;
- eolico;
- fotovoltaico;
- solare termico.

In particolare, fotovoltaico e solare termico sono fonti energetiche direttamente derivate dalla principale fonte d'energia del sistema solare, il Sole, ed appaiono molto interessanti per diversi aspetti, tra i quali principalmente si possono annoverare:

- compatibilmente con la latitudine d'installazione, il sole è presente ovunque;
- l'energia solare è gratuita, ed abbondante proprio dove è più necessaria, ovvero la fascia tropico-equatoriale, dove è presente un'alta percentuale di paesi poveri;
- il sole fornirà energia per un tempo lunghissimo;
- l'energia solare non inquina.

Se a tutto ciò si aggiunge che la quantità di energia che tale stella irraggia sul nostro pianeta è smisuratamente superiore alle attuali e future richieste energetiche, appare chiaro come lo studio di tecnologie atte alla raccolta e trasformazione di tale risorsa sia di primaria importanza.



**Figura 1.3** - Distribuzione della radiazione solare nell'area mediterranea

I pannelli fotovoltaici, formati principalmente da silicio (mono o multi cristallino), hanno il vantaggio di restituire in uscita una corrente elettrica che, mediante un opportuno apparecchio di adattamento, inverter, è già direttamente immisibile in rete. Tale tecnologia è stata svantaggiata da costi elevati, dovuto sia al costo del silicio impiegato che deve subire lavorazioni molto particolari, sia all'abbondante impiego di energia necessaria per realizzarlo. Inoltre, il silicio, alla fine della sua vita utile, deve essere smaltito, comportando ulteriori costi di smaltimento.

Bisogna però aggiungere che da un anno a questa parte i costi del fotovoltaico sono precipitati, dovuto probabilmente alla sua espansione in tutti i campi del mercato, sia in ambito industriale, sia in quello privato. Tuttora, a livello di costi, esso può risultare più conveniente rispetto al solare termodinamico; infatti addirittura negli USA un intero impianto termodinamico in via di costruzione è stato radicalmente convertito in un impianto fotovoltaico.

Inoltre, per piccole installazioni ad uso domestico, al netto degli incentivi statali, è molto conveniente.

Per quanto riguarda il solare termico invece, la situazione è diversa. Il principio di funzionamento è basato sulla conversione dell'energia irradiata dal sole in calore da trasferire ad un fluido termovettore (efficienza elettrica del 15%, circa uguale a quella del fotovoltaico). Si desume facilmente che per piccole installazioni tale tecnologia può essere utile al fine di produrre acqua

calda ad uso igienico, o anche per il riscaldamento di piccole abitazioni. Ma è nelle installazioni di grossa taglia che tale tecnologia trova la sua massima espressione, grazie a due punti di forza:

- i. costo relativamente basso, in quanto, in linea di principio, sono sufficienti un tubo in cui scorre un fluido termovettore e degli specchi che concentrino su di esso la luce solare;
- ii. alto rendimento di conversione dell'energia in calore, prossimo al 70% in presenza di centrali ibride che sfruttano, oltre all'energia elettrica, anche il calore;
- iii. accumulo del fluido termovettore, che consente di immettere l'energia in rete quando è più vantaggioso e comunque l'accumulo stabilizza la produzione.

Tali vantaggi trovano interessanti prospettive proprio nelle centrali di produzione di energia elettrica dotate di turbine a vapore, in quanto il calore assorbito dal fluido termovettore può essere utilizzato mediante appositi scambiatori, per la produzione di vapore. In tal modo vi è la possibilità di integrare la produzione di vapore ottenuto da combustibili fossili in centrali già esistenti (cogenerazione), ed eventualmente costruirne di nuove interamente basate su tale tecnologia in località caratterizzate da un irraggiamento solare particolarmente favorevole, come ad esempio la fascia tropicale Sahariana nordafricana. In tal modo sarebbe possibile importare in Italia e Spagna l'energia elettrica prodotta in paesi come Marocco, Algeria e Tunisia mediante cavi sottomarini posti sul fondale marino. Su tale scenario sono già stati condotti studi di fattibilità, e si è dedotto che la cosa è concepibile e, prevedendo un futuro innalzamento del costo del kWh ottenuto da fonti tradizionali, anche economicamente vantaggiosa.

Gerhard Knies, fisico in pensione, è stato l'ideatore di DESERTEC nel 2009 dopo la scoperta che "in 6 ore il deserto generava più energia di quella usata dalla popolazione umana in un anno". Con questa idea ha creato DESERTEC, una rete di compagnie che lavorano insieme per creare le condizioni legali, sociali, politiche e finanziarie per promuovere l'energia solare termica.

Secondo le prime stime, il costo totale per quest'infrastruttura sarebbe di 400 miliardi di Euro per consentire alla zona MENA ( Middle East and North Africa) di soddisfare il 15% delle necessità europee. Se Knies ha ragione, il cambio dell'energia fossile in energia solare diventerà l'industria più prospera del futuro.

La concentrazione d'energia solare (CSP, Concentrated Solar Power) è la tecnologia prediletta nella visione DESERTEC per il deserto di MENA. Con la CSP la luce del sole è usata per riscaldare il fluido. Ad esempio il sale fuso può essere riscaldato a più di 500°C ed i fluidi possono essere

convogliati in altre locazioni. L'energia è conservata come fluido caldo e convertita in elettricità attraverso turbine a vapore. “Questa è un’opportunità per creare un sistema in cui si possa apportare dell’energia secondo la domanda, non solo quando brilla il sole”, secondo Robert Pitz Paal, il direttore di ricerca sull’energia solare del centro aerospaziale di Germania.

## 1.2 – Tecnologia solare termica: lo stato attuale

### 1.2.1 – Principali caratteristiche

L’impianto solare studiato è del tipo termico a concentrazione, CSP, spesso chiamato anche STPP, Solar Thermal Power Plant. La struttura di quest’impianto è formata da quattro elementi base:

- i. concentratore;
- ii. ricevitore;
- iii. sistema di trasporto;
- iv. sistema di conversione dell’energia.

Il funzionamento di quest’impianto è semplice: il concentratore cattura e concentra la radiazione solare sul ricevitore. Il ricevitore assorbe la luce solare concentrata, trasferendo la sua energia termica ad un fluido di lavoro, che tramite il sistema di trasporto viene inviato al sistema di conversione. In alternativa alla conversione immediata dell’energia termica, è possibile accumulare una parte di quest’energia per usarla successivamente.

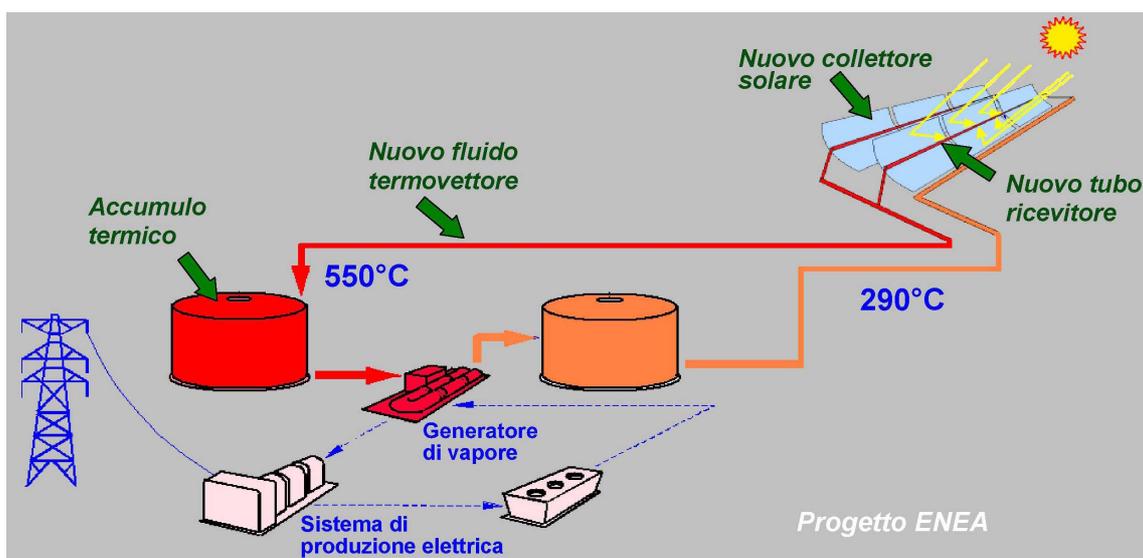


Figura 1.4 - Schema di un impianto STPP

Nel sistema di conversione, l'energia termica viene utilizzata per la produzione di energia elettrica. Il sistema di conversione è analogo ai comuni impianti di produzione a combustibile fossile e può utilizzare un ciclo termico Rankine a vapore oppure un ciclo combinato con turbina a gas. Nel primo caso l'energia è utilizzata come sorgente primaria per la produzione del vapore mentre nel secondo caso è utilizzata come integrazione alla produzione di vapore dal recupero del calore dai gas di scarico della turbina a gas, quindi il sistema solare da solo non produce energia elettrica.

### **1.2.2 – Descrizione del sistema**

La tecnologia scelta per la realizzazione dell'impianto è quella costituita da collettori parabolici lineari, denominati STPP. Essa è attualmente la tipologia di concentratori più matura nell'ambito dei sistemi di produzione di energia elettrica da solare termico ad alta temperatura, rispetto agli impianti attualmente in esercizio o di futura realizzazione ( si possono distinguere in dish, tower e Fresnel lineare). L'impianto solare in studio presso l'ENEA, presenta caratteristiche innovative che lo rendono all'avanguardia per questo tipo di tecnologia.

La principale innovazione riguarda il fluido termico, utilizzato nel collettore per l'asportazione del calore solare. Negli altri impianti precedenti, come il SEGS (Solar Electric Generating Station), situato negli USA, si utilizza un olio minerale altamente infiammabile e costoso, che quindi può dar luogo a grossi problemi in caso di fuoriuscita alle temperature di esercizio (290 – 390 °C); questo è stato sostituito da una miscela di sali, nitrati di sodio e di potassio (alla base dei comuni fertilizzanti), largamente utilizzati nell'industria, chimicamente stabili fino a circa 600°C, senza grossi problemi di corrosione. L'utilizzo dei sali, oltre ad una riduzione del pericolo connesso all'esercizio degli impianti, consente di ottenere temperature di esercizio più elevate (290 - 580°C), con miglioramento dell'efficienza del circuito utilizzatore del calore solare. Inoltre non impiegando materiali tossici, infiammabili o altrimenti pericolosi: l'intero sistema non è sorgente di rischio o di altri fastidi ( rumore ) per le popolazioni presenti nelle sue vicinanze. In particolare il liquido termovettore utilizzato è un comune fertilizzante, già ampiamente usato in agricoltura, ed eventuali fuoriuscite accidentali non avranno alcun impatto ambientale.

Per la realizzazione dell'impianto non sono richieste strutture elevate ed i collettori solari, posizionati in modo ordinato e seguendo il profilo del terreno, non deturpano il paesaggio. Il tempo di ritorno energetico del sistema è dell'ordine di solo sei mesi, meno del 2% dell'energia prodotta durante il periodo di funzionamento. Ciò rappresenta una frazione molto inferiore rispetto ad esempio alla tecnologia fotovoltaica. Alla fine del periodo di utilizzazione, se si considerano gli

specchi tradizionali o quelli innovativi basati sull'alluminio, molti dei materiali possono essere o riciclati o ripristinati per ulteriori installazioni.

Una volta che i sistemi di captazione ed accumulo dell'energia solare verranno prodotti su una scala sufficientemente grande, la produzione e l'erogazione di calore ad alta temperatura (circa 550°C) potrà essere fatta, considerando località ad elevata insolazione, ad un costo di circa 2 \$/GJ, non superiore all'analogo costo previsto nel futuro per il gas naturale ed il petrolio.

L'uso dell'accumulo termico permette l'erogazione di energia su richiesta, indipendentemente dall'ora (giorno o notte). Le discontinuità della radiazione solare a breve termine (nuvole) e del ciclo notte/giorno sono completamente compensate, come pure le giornate senza Sole, purché non eccessivamente persistenti. In particolare la produzione di elettricità può prontamente seguire la variazione della domanda giornaliera.

Il collettore solare, dove avviene la raccolta, la concentrazione e l'assorbimento della radiazione solare è stato completamente rinnovato rispetto ai modelli in commercio, sia nella parte strutturale che nel riflettore e nel tubo ricevitore, con l'obiettivo sia della riduzione dei costi di produzione, installazione e manutenzione, che del miglioramento delle prestazioni termiche.

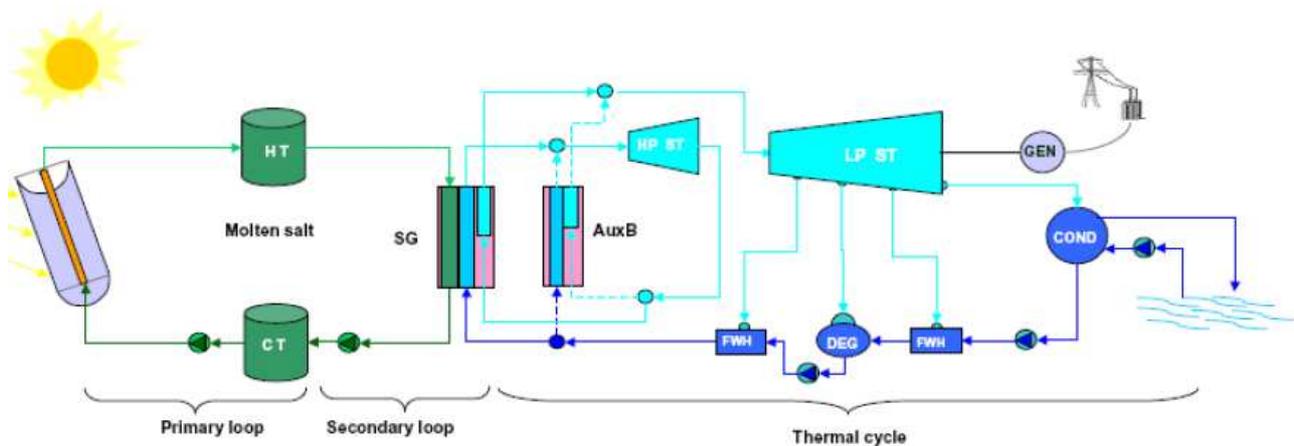
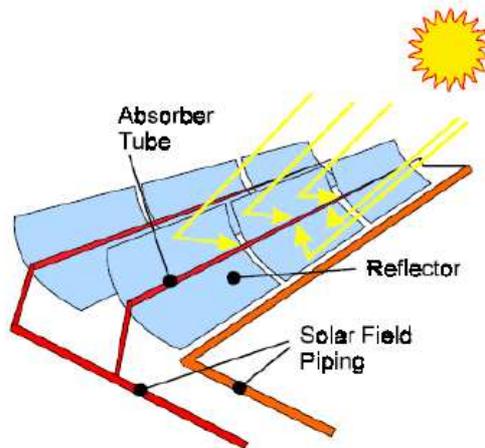


Figura 1.5 - Schema semplificato di un impianto a concentrazione solare

Nella Figura 1.5 è riportato lo schema sintetico dell'impianto solare. Sono presenti tre circuiti separati:

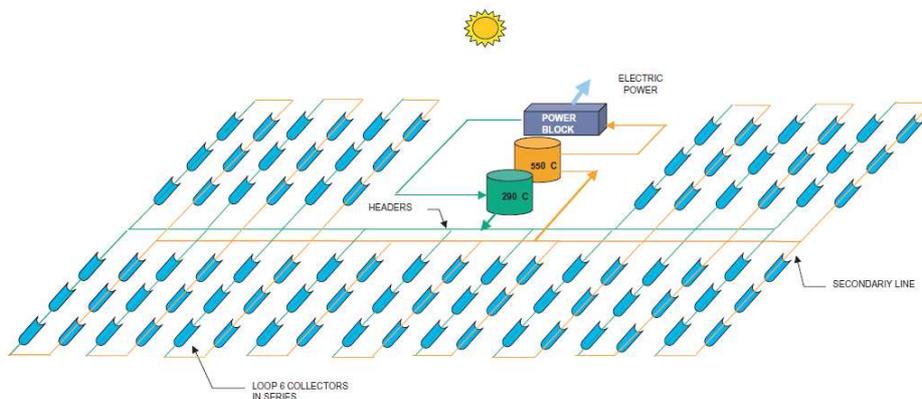
- i. *Primary loop*: il circuito primario in cui viene effettuata la concentrazione, la raccolta, la distribuzione e l'accumulo dell'energia termica solare.
- ii. *Secondary loop*: il circuito secondario in cui l'energia accumulata, nel serbatoio caldo, viene utilizzata in un opportuno generatore di vapore.

- iii. *Thermal cycle*: il ciclo termico in cui viene effettuata la conversione dell'energia termica in energia elettrica.



**Figura 1.6** – Esempio di funzionamento del collettore

La dimensione del campo solare è in funzione della potenza dell'impianto e della dimensione dell'accumulo termico che si intende realizzare, ed è costituito da collettori parabolici lineari collegati in serie e disposti in file parallele (Figura 1.7).



**Figura 1.7** – schematizzazione di una centrale ad energia solare termica

Il campo solare presenta quindi una struttura di tipo modulare, aggiungendo moduli (insieme di file di collettori), si aumenta l'energia termica raccolta e quindi la potenza dell'impianto. In posizione baricentrica rispetto al campo solare, per contenere lo sviluppo della rete di raccolta, è situata la centrale termica: il generatore di vapore, la turbina, il condensatore e tutti i circuiti ausiliari ed i serbatoi di accumulo.



**Figura 1.8** – Collettori solari

I collettori (Figura 1.8) sono costituiti da un riflettore di forma parabolica. Questi possono essere realizzati utilizzando specchi in vetro (sono la soluzione tradizionale); mentre l'ENEA ha introdotto l'idea di vetro sottile su dorso rigido. Altri propongono trattamenti superficiali o fogli riflettenti da porre su un dorso rigido. Il riflettore concentra continuamente, tramite un opportuno sistema di controllo, la radiazione diretta del sole su un tubo assorbitore (ricevitore), disposto sul fuoco della parabola ed al cui interno viene fatto circolare il fluido per l'asportazione del calore solare (miscela del 60% di nitrato di sodio e 40% di nitrato di potassio). Tale ricevitore è a sua volta formato da:

- *un tubo metallico in acciaio AISI 316L dal diametro di 70mm, al cui interno scorre il fluido termovettore, rivestito con un particolare trattamento di deposito esterno (rivestimento selettivo chiamato coating) per garantire un ottimale assorbimento dell'energia concentrata su di esso e al contempo perderne la minor quota possibile;*

- un tubo in vetro borosilicato dal diametro esterno di 125 mm e spessore di 3 mm, concentrico al tubo metallico, con lo scopo di creare un'intercapedine tra i due in cui viene creato il vuoto, al fine di minimizzare le perdite di calore.

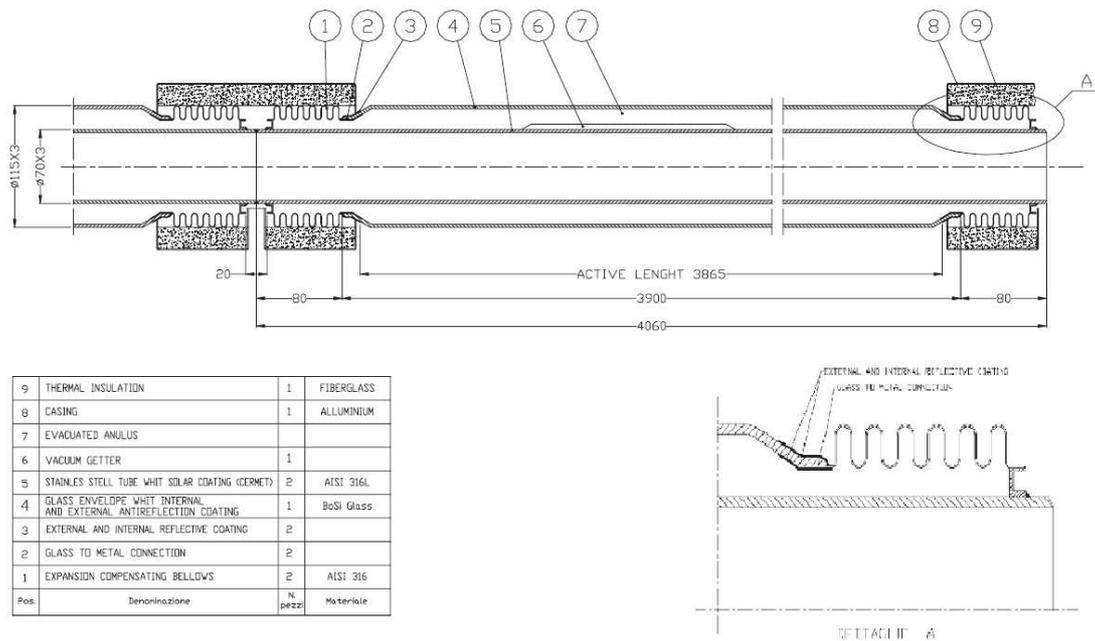


Figura 1.9 – Schema tubo ricevitore

I collettori possono essere disposti, sul campo solare, sia lungo la direzione N-S che E-O. La scelta può essere fatta in base alla latitudine del sito ed al tipo di funzionamento che è previsto per l'impianto. La direzione N-S consente di ottenere una migliore raccolta dell'energia solare nei mesi estivi rispetto a quelli invernali e globalmente l'energia risulta essere superiore rispetto alla disposizione E-O, però quest'ultima disposizione presenta una distribuzione più uniforme nel tempo dell'energia raccolta.

In presenza di radiazione solare il fluido termico, prelevato dal serbatoio ad una temperatura di circa 290°C, poiché a temperature inferiori si solidifica, viene fatto circolare attraverso la rete di collettori dove si scalda fino ad una temperatura di circa 550°C ed inviato al serbatoio caldo a costituire l'accumulo dell'energia termica. La portata dei sali nel circuito primario viene regolata in funzione dell'intensità della radiazione solare in modo da mantenere costante la temperatura in ingresso al serbatoio caldo. Poiché i sali utilizzati presentano un'alta temperatura di solidificazione (238°C), in assenza di radiazione solare è necessario mantenere una portata minima attraverso il campo solare immettendo opportunamente del fluido caldo nel circuito. È previsto, durante la fase di riempimento del circuito, un riscaldamento elettrico. I sistemi di riscaldamento servono inoltre

per compensare le dispersioni termiche ed impedire che la temperatura scenda al di sotto di questo valore. Quando è richiesta la produzione di energia elettrica i sali del serbatoio caldo vengono inviati ad uno scambiatore di calore dove viene prodotto vapore, ad alta pressione ed elevata temperatura, utilizzato nel ciclo termico. Successivamente i sali vengono re-immessi nel serbatoio freddo. Il ciclo termico è analogo a quello delle centrali termiche convenzionali, comprende: una turbina a vapore accoppiata ad un generatore elettrico, un condensatore ed i sistemi di preriscaldamento dell'acqua di alimento. Poiché si utilizza un ciclo con surriscaldamento del vapore, sono presenti due turbine: una di alta e una di bassa pressione. Il vapore surriscaldato, prodotto ad una pressione di 120 bar ed una temperatura di 525°C, viene fatto espandere attraverso la turbina di alta pressione, quindi inviato nel generatore di vapore per essere riportato nelle stesse condizioni iniziali di temperatura, e mandato alla turbina di bassa pressione. Il vapore condensato viene preriscaldato per essere successivamente inviato come acqua di alimento al generatore di vapore.

Nello schema in Figura 1.5 è presente anche una caldaia ausiliaria di integrazione (AuxB) che, specialmente in assenza di accumulo termico, permette di estendere il funzionamento dell'impianto oltre le ore di normale insolazione o in caso di nuvolosità, rendendolo maggiormente rispondente a quelle che sono le richieste di carico della rete elettrica.

### **1.3 – Oggetto tesi e punti analizzati**

Oggetto della presente tesi è la modellazione ottica di un radiometro mobile per concentratori solari termodinamici con ricevitore cilindrico. Il radiometro, applicato al tubo ricevitore è in grado di eseguire misurazioni accurate del flusso luminoso entrante ed uscente dal tubo ricevitore.

Tali misurazioni possono essere utili in particolar modo per due problematiche:

- Analisi della reale quantità di energia raccolta dal ricevitore e relativa comparazione con quanto ottenuto per via teorica e simulativa;
- Controllo (periodico) del flusso concentrato dagli specchi sul ricevitore, in modo da valutare eventuali disallineamenti o deformazioni degli specchi.

Il lavoro svolto in questa tesi segue quello svolto dall'Ing. Moretti nella tesi "Progetto di un prototipo di radiometro mobile per collettori solari termodinamici cilindrici". Lo scopo della sua tesi è stato appunto di progettare il radiometro, mentre in questa tesi simuleremo il comportamento

del radiometro analizzando il flusso che i sensori interni ed esterni di questo misurano. In tal modo è possibile ricavare dal confronto l'efficienza ottica del sistema ricevitore.

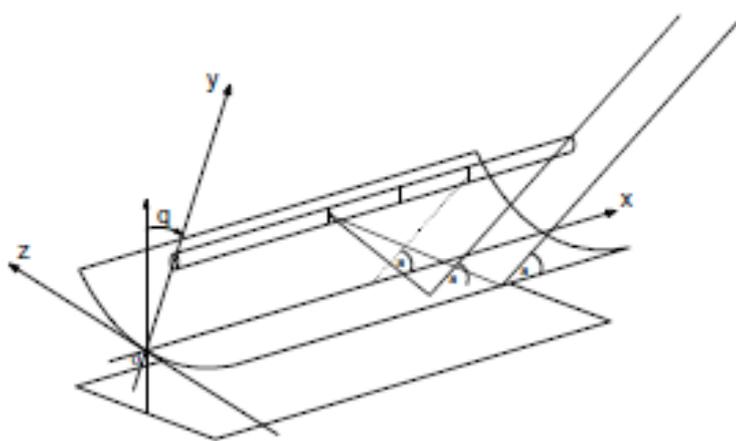
L'efficienza ottica complessiva del concentratore richiede la misura (o nel nostro caso la simulazione) della radiazione incidente e di quella riflessa dallo specchio parabolico. Le simulazioni fatte non richiedono l'uso del radiometro, in quanto è sufficiente considerare la radiazione che attraversa le superfici virtuali sulle quali si muovono i corrispondenti ai sensori.

## Capitolo 2: Caratteristiche del collettore solare

### **2.1 – Configurazione del collettore**

La funzione del collettore solare è quella di concentrare l'energia solare incidente e trasferirla sotto forma di calore al fluido termovettore che circola nel circuito primario.

Il collettore solare, del tipo parabolico lineare, si configura schematicamente come una superficie riflettente cilindroparabolica (concentratore), cioè una superficie generata dalla traslazione di un arco di parabola lungo una linea retta perpendicolare al piano della parabola stessa, con un tubo assorbitore centrale (ricevitore), in prima approssimazione coassiale con la retta unione dei fuochi delle singole sezioni paraboliche. Concentratore e ricevitore devono essere in grado di ruotare attorno ad un asse parallelo all'asse del ricevitore in modo da realizzare la condizione che il piano contenente gli assi delle sezioni paraboliche sia costantemente parallelo alla direzione della radiazione solare. In tal modo la luce solare incidente sulle superfici riflettenti e da queste concentrata verrà costantemente intercettata dal tubo ricevitore in qualsiasi posizione assunta dal sole durante il suo moto apparente che varia, com'è noto, in funzione dell'ora e del giorno dell'anno, come schematizzato in Figura 2.1.



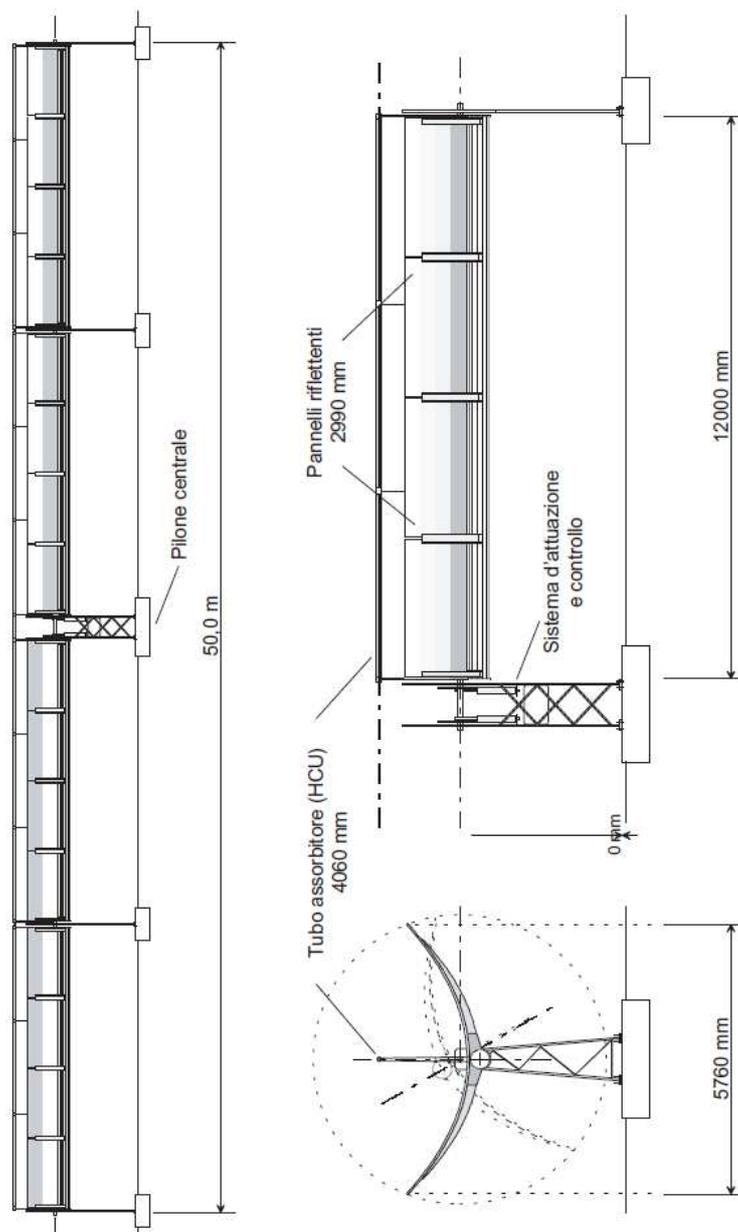
**Figura 2.1** – Rappresentazione grafica riflessione raggi

Il sistema collettore solare si configura come un apparato autonomo in grado di realizzare le funzioni ora descritte e replicabile in un numero anche elevato di unità tra loro collegate in serie a formare delle stringhe, a loro volta collegate in parallelo a costituire il campo solare dell'impianto.

Il sistema collettore solare, benché autonomo, sarà collegato ad una rete d'alimentazione per il funzionamento dei suoi organi attivi, e risponderà ai comandi di un sistema di gestione centrale dell'impianto che ne definirà costantemente lo stato operativo e ne imposterà i parametri di funzionamento.

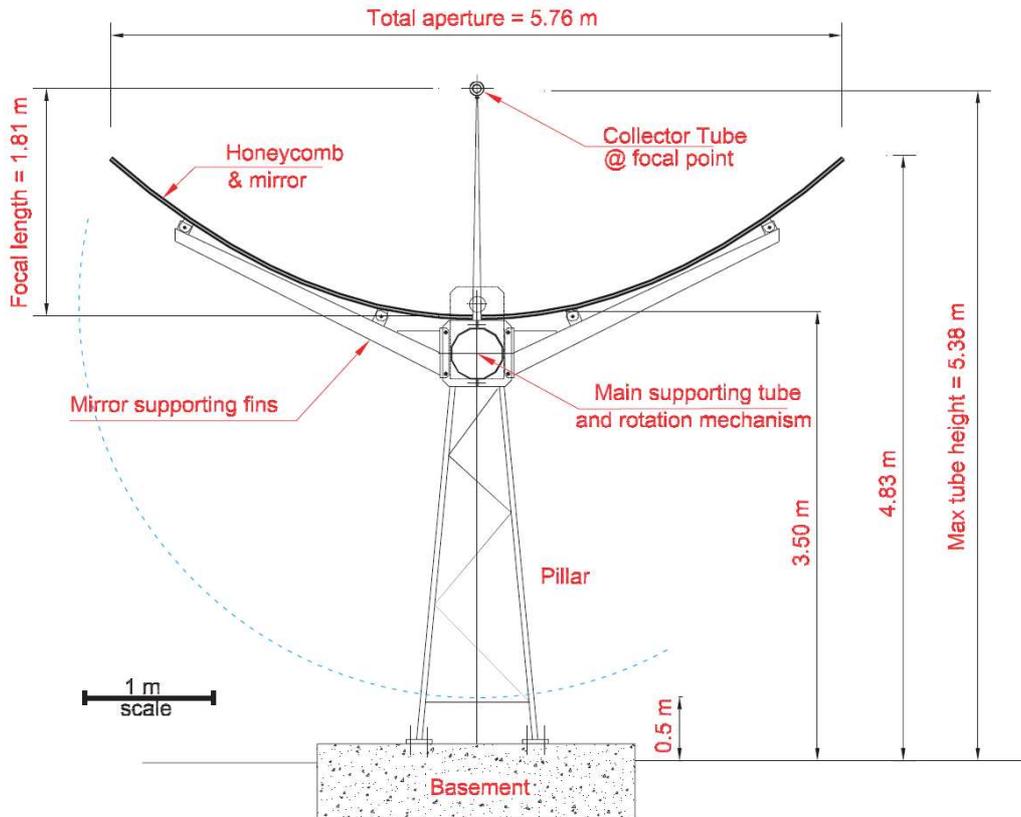
La raccolta dell'energia dovrà essere effettuata con il massimo dell'efficienza in ogni condizione e durante l'intera vita operativa dell'impianto in modo da massimizzare la produttività dello stesso.

Il collettore solare è composto da più moduli collegati meccanicamente ed azionati da un unico sistema di movimentazione, posto al centro, che fa ruotare simultaneamente i due rami del collettore, come illustrato in Figura 2.2.



**Figura 2.2** – Modello del collettore solare

Ogni pannello solare è definito dalle misure mostrate nella Figura 2.3.



**Figura 2.3** – Profilo con dimensioni del collettore solare

Ciascun modulo è costituito da una struttura portante, dai pannelli riflettenti, dai piloni di appoggio al suolo e dalla linea di tubi ricevitori con relativi supporti. La geometria delle superfici riflettenti è definita dal progetto ottico del collettore e le tolleranze rispetto alle dimensioni nominali sono derivate dalle verifiche sulle perdite di efficienza ottica.

La lunghezza del modulo viene definita dal numero di tubi ricevitori posti in serie che, analogamente alle produzioni correnti, viene fissato in 3 unità per uno sviluppo complessivo di circa 12 m.

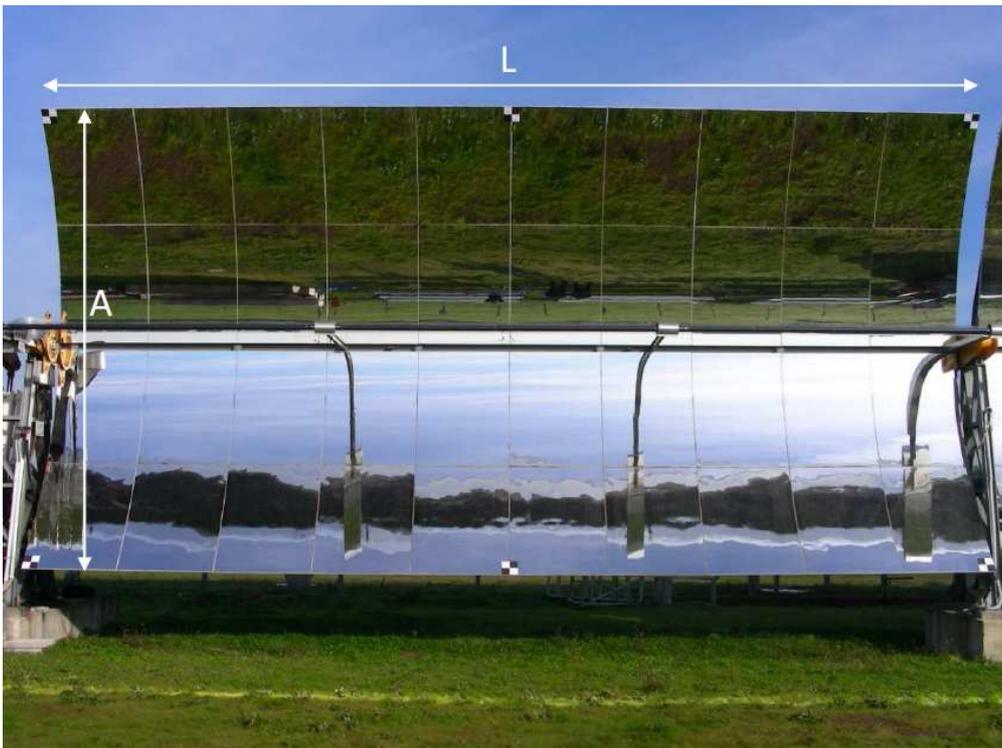
Le caratteristiche funzionali del collettore verranno descritte raggruppandole in due sezioni differenti: la prima relativa al sistema di concentrazione, di movimentazione e di supporto, in questo ambito definito come sistema di concentrazione, e la seconda riguardante il tubo ricevitore.

## 2.2 – Caratteristiche del sistema di concentrazione

La parte riflettente del sistema di concentrazione, analizzando quello realizzato dall'ENEA, è costituita da una serie di pannelli riflettenti che realizzano una superficie cilindroparabolica la cui sezione retta è nominalmente una parabola di apertura 5900 mm e fuoco posto a 1810 mm dal vertice.

La parabola ha equazione  $y = ax^2$  con  $a = 1/4F$  e la superficie riflettente la percorre fino ad un'ascissa curvilinea pari a 3250 mm; ciò corrisponde a due lastre accostate nel senso della loro lunghezza iniziando la curvatura del vetro dopo 50 mm.

I pannelli, tutti uguali fra loro per ragioni di economia di costruzione e semplicità di montaggio, realizzano porzioni della superficie riflettente corrispondenti a metà dell'arco di parabola e sviluppate longitudinalmente, in prima approssimazione, per una frazione intera della lunghezza dell'intero modulo; i pannelli non sono perfettamente contigui ma presentano tra l'uno e l'altro delle aperture limitate dovute ad esigenze progettuali e di montaggio.



**Figura 2.4** – Vista frontale di un modulo del collettore,  $L= 12080$  e  $A= 5900$

I pannelli vengono sostenuti da una struttura di supporto basata su una trave centrale, tubo di torsione, sostenuta all'estremità da due piloni di sostegno che assicurano al suolo l'intero modulo. Alla trave centrale sono collegati oltre ai pannelli, i bracci di sostegno del tubo ricevitore articolati

in maniera tale da consentire le considerevoli dilatazioni termiche cui è soggetta la tubazione attraversata dal fluido termovettore.

Il collettore è un componente attivo dell'impianto di generazione di energia, costantemente in funzione durante tutta la vita operativa dell'impianto stesso.

### *Sottosistema di attuazione e controllo*

Il sottosistema di attuazione e controllo ha come compito principale quello di muovere il collettore durante la fase di produzione di calore in modo da posizionarsi costantemente con il piano formato dall'asse della parabola e dall'asse del tubo ricevitore sulla posizione attuale del sole.

La rotazione del sistema di concentrazione avviene su un asse passante per il baricentro della parte mobile dei moduli, che si colloca in posizione intermedia tra l'asse di simmetria della trave ed il fuoco della parabola; il tubo di torsione, pertanto, reca alle estremità due piastre per riportare l'appoggio sui piloni di supporto all'altezza dell'asse di rotazione, come mostrato in Figura 2.5.

Ogni collettore ha un sensore che indica l'angolo di puntamento corrente. L'inseguimento del sole viene comandato dalla stazione di controllo centrale. Inoltre, l'angolo ottimale di inseguimento solare non è determinato sperimentalmente, ma calcolato in base ad un algoritmo matematico funzione del tempo universale e delle coordinate terrestri dell'impianto. Il sistema di movimentazione è costituito da una parte di attuazione meccanica in grado di far compiere le rotazioni del concentratore entro il campo definito dalle diverse condizioni operative e con le velocità e la precisione di posizionamento richiesta. L'operazione di inseguimento è monitorata da un computer centrale d'impianto dal quale l'unità locale d'inseguimento riceve istruzioni per l'attivazione delle diverse condizioni operative e la modifica dei parametri di controllo, ed al quale invia informazioni sullo stato operativo, la posizione effettiva, la diagnostica e gli allarmi.

Il sistema di movimentazione può avere un moto continuo o discontinuo con passo comunque non superiore a 0.8 mrad. La precisione del puntamento dovrà essere comunque tale da garantire un errore inferiore a 1.6 mrad.

I piloni costituiscono la parte fissa del sistema di concentrazione ed avranno altezza tale da consentire la rotazione libera della parte mobile entro gli angoli definiti dalle diverse condizioni operative. Mentre i piloni di supporto dei singoli moduli saranno tra loro uguali, il pilone centrale del sistema di concentrazione sarà disegnato in modo da accogliere il sistema di movimentazione dell'intero collettore.



**Figura 2.5** – Vista laterale di un modulo del collettore

Oltre al compito di posizionare correttamente il collettore rispetto alla posizione del sole, il sistema di movimentazione dovrà garantire il posizionamento dello stesso in condizioni di sicurezza. Le occasioni in cui il collettore viene messo fuori servizio si verifica sia durante le ore notturne che in caso di condizioni meteo avverse; ad esempio il superamento della velocità limite del vento, improvvise precipitazioni, grandinate etc. possono compromettere l'integrità e la piena funzionalità del componente. In questo caso il collettore viene disposto in posizione di sicurezza, ossia con l'asse della parabola rivolto sotto la linea di orizzonte, in modo da esporre alla grandine il dorso posteriore. In queste situazioni vengono richieste le massime prestazioni dal sistema di movimentazione quanto a velocità di attuazione e coppia motrice erogata.

Il collettore può inoltre assumere la condizione di riposo nel caso di interventi di manutenzione straordinaria, che prevedano la sostituzione di parti importanti del sistema di concentrazione o di uno o più tubi ricevitori.

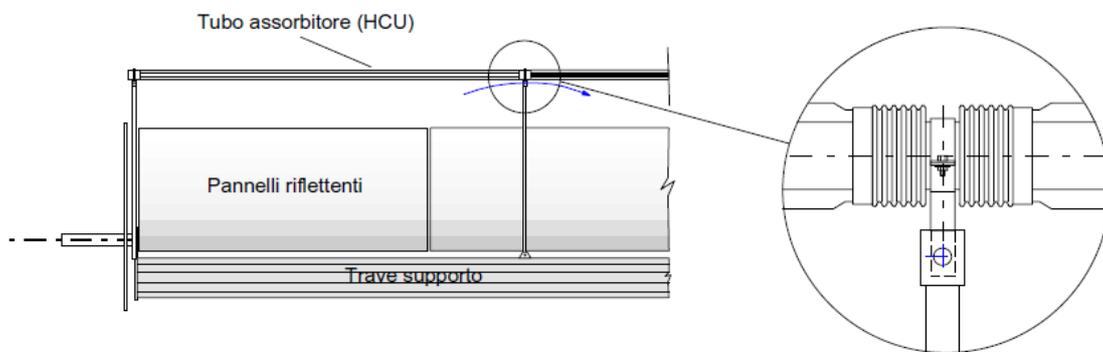
### *Supporti tubo ricevitore*

Funzione del sistema di supporto dei tubi ricevitori è quello di mantenere in posizione il ricevitore, assecondando le dilatazioni termiche occorrenti nel tubo metallico assorbitore, e sostenendone il peso ed i carichi del vento applicati ad esso. Poiché i tubi ricevitori vengono tra loro giunti per saldatura, la dilatazione termica si accumula su tutta la lunghezza del ramo del collettore per poi

venire compensata dai raccordi idraulici di collegamento con il collettore contiguo o con la rete primaria.

Nella Figura 2.6 è riportato uno schema di principio del sistema di sostegno del tubo ricevitore e del meccanismo di compensazione della dilatazione sulla linea.

Il sistema di supporto dovrà essere in grado di compensare dilatazioni della linea realizzata in tubo d'acciaio AISI 316L in un campo di temperatura compreso tra la temperatura ambiente, sperimentata in fase di installazione, e la temperatura massima operativa del tubo ricevitore, pari a 580 °C, senza causare condizioni di stress termomeccanico incompatibili con la funzionalità e la durata del componente. Inoltre, nell'intervallo delle temperature di lavoro (290-550 °C), lo spostamento dell'asse del tubo ricevitore dalla sua posizione nominale non dovrà essere superiore a 5 mm, in nessun punto della linea.



**Figura 2.6** – Particolare del raccordo fra i tubi ricevitori

### **2.3 – Caratteristiche del sistema ricevitore**

Il sistema ricevitore ha la funzione di trasferire l'energia solare, concentrata dal sistema di concentrazione, al fluido che scorre al suo interno, garantendo la costanza delle prestazioni nel tempo e minimizzando le dispersioni di calore verso l'ambiente. Ciò comporta un'adeguata resistenza agli agenti atmosferici e alle escursioni termiche indotte dalla variabilità del flusso solare.

Il sistema, come mostrato nello schema di Figura 1.9, è composto da:

- a) un tubo ricevitore metallico in acciaio inossidabile (AISI 316L);
- b) coating selettivo di rivestimento applicato alla superficie esterna del tubo ricevitore;

- c) un tubo di vetro con funzione di isolante ad elevata trasmittanza con trattamenti antiriflesso sulla superficie esterna ed interna;
- d) soffietti metallici in grado di assorbire dilatazioni differenziali tra il tubo centrale metallico e il tubo esterno in vetro.

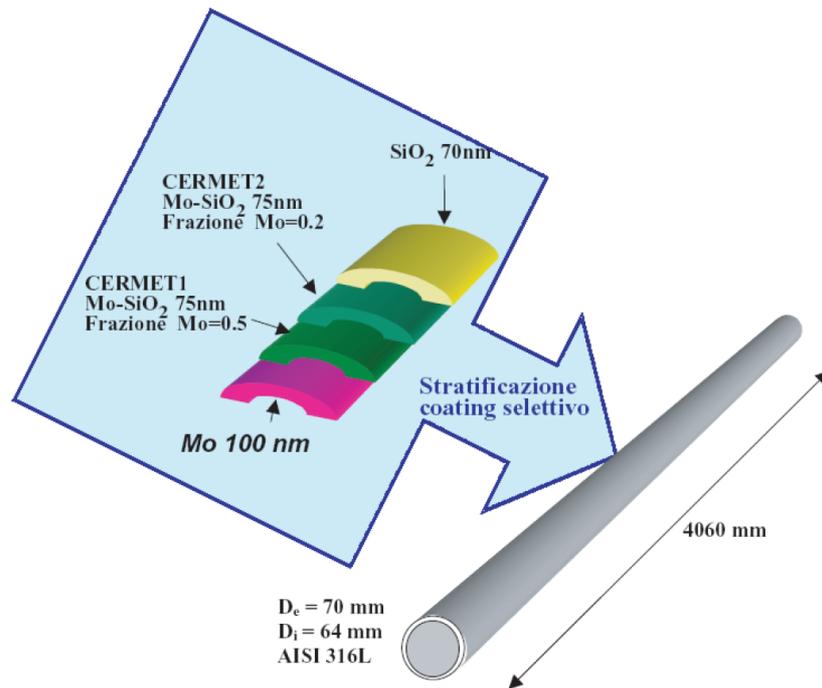
Il tubo ricevitore in acciaio inossidabile (tipo AISI 316L o equivalenti) deve resistere agli stress di origine meccanica e termica sia statici che dinamici e garantire integrità e tenuta del componente per la vita prevista dell'impianto.

Deve essere verificata la compatibilità con il fluido termovettore e l'idoneità a supportare il materiale di rivestimento nel campo delle temperature di esercizio: 290 - 550°C. Il rivestimento superficiale del tubo (coating) deve essere realizzato in materiale avente le seguenti caratteristiche:

- i. un elevato assorbimento della radiazione incidente nella regione spettrale della radiazione solare e una emittanza prossima a zero nella regione dell'infrarosso con passaggio a gradino tra le due regioni;
- ii. essere in grado di sopportare temperature operative fino a 550 °C con escursioni di breve durata fino a 600°C.

A titolo di esempio si può ipotizzare l'utilizzo di un materiale composito ceramico-metallico (tipo CERMET), costituito da una stratificazione di film sottili spettralmente selettivi. Il tubo di vetro al BoSi con trattamenti antiriflesso sulla superficie esterna ed interna, deve assicurare la massima trasmittanza della luce solare e minimizzare l'irraggiamento verso l'ambiente della radiazione nello spettro dell'infrarosso.

Secondo il progetto ENEA, il tubo ricevitore dovrà operare ad una temperatura superficiale compresa nell'intervallo 300 ÷ 580 °C. Esso avrà caratteristiche tecniche e costruttive uguali per tutto lo sviluppo della lunghezza del singolo loop (600 m). L'elemento di partenza è un tubo di acciaio AISI 316L con diametro esterno 70 mm e spessore di parete pari a 3 mm. La superficie del tubo sarà opportunamente trattata per migliorare le proprietà di adesione dei film che su di essa andranno depositati. Il grado di finitura della superficie del tubo influenzerà fortemente le proprietà assorbitive ed emissive del rivestimento. Nella Figura 2.7 è mostrata la stratificazione di un rivestimento spettralmente selettivo ottimizzato per operare con alti valori di efficienza foto termica in tutto l'intervallo di temperatura su menzionato.



**Figura 2.7** – Illustrazione della stratificazione del coating

La temperatura di equilibrio del tubo di vetro dipende dalle proprietà ottiche del materiale (assorbanza nel campo di radiazioni infrarosso) e dalle condizioni al contorno di temperatura (ambiente e tubo ricevitore): per una temperatura ambiente di 30°C risulta essere di circa 100°C. Deve inoltre essere verificata la resistenza del tubo di vetro e soprattutto del giunto metallo - vetro anche a seguito di violenti shock termici che possono essere indotti per esempio da improvvisa pioggia sulle parti calde. Per limitare tali problemi sul giunto è indispensabile proteggere la zona di giunzione dalla luce solare concentrata. A tale scopo sono previsti trattamenti locali per aumentare la riflettanza delle superfici interessate, quali riporti di alluminio o argento, sotto forma di nastri incollati o sotto forma di coating. Nell'intercapedine tra il tubo di vetro e il tubo centrale è praticato il vuoto per diminuire le dispersioni termiche (riducendo così anche la temperatura del tubo di vetro) e per proteggere il coating selettivo del tubo centrale, con un grado di vuoto inferiore ad 1 Pa. Le superfici dell'intercapedine (tubo metallico, soffiotti, tubo di vetro) debbono essere esenti da sostanze che alle temperature di lavoro del ricevitore possano evaporare e quindi depositarsi sulla superficie interna del tubo di vetro (che è la zona più fredda dell'intercapedine) causando opacità che ridurrebbero l'efficienza del componente. I due soffiotti metallici posti alle estremità del modulo ricevente devono assorbire una dilatazione differenziale massima 40 mm (20 mm per ciascun soffiotto), avere una sufficiente rigidità agli sforzi radiali ed essere dimensionati per un numero di cicli di dilatazione adeguato alla durata dell'impianto. Il sistema ricevitore è composto da moduli della lunghezza complessiva di 4060 millimetri con una lunghezza attiva di ricezione pari a

3865 mm. Il tubo centrale in acciaio inossidabile AISI 316L deve avere un diametro esterno di 70 mm e uno spessore di 3 mm. Il tubo di vetro, di lunghezza pari alla lunghezza attiva, deve avere un diametro esterno di 125 mm e uno spessore di 3 mm. La linea d'asse del tubo ricevitore è posta a 1.81 m rispetto al vertice degli specchi parabolici (in corrispondenza del fuoco della parabola) con uno scostamento massimo di 0.5 cm durante il normale funzionamento. Nella Tabella 2.1 sono riassunti i principali parametri del sistema ricevitore.

Diametro tubo di vetro	125	mm
Spessore vetro	3	mm
Diametro tubo acciaio	70	mm
Spessore tubo acciaio	3	mm
Lunghezza tubo ricevitore	4060	mm
Lunghezza attiva	3865	mm
Grado di vuoto	<1	Pa
Assorbanza solare coating	>0.9	-
emittanza coating (a 550°)	<0.15	-
Dilatazione differenziale max metallo-vetro	40	mm
T max tubo ricevitore	580	°C
T max vetro	100	°C
Pressione max	1.2	MPa

**Tabella 2.1** – Tabella riassuntiva dei parametri del ricevitore

## **2.4 - Caratteristiche dei materiali**

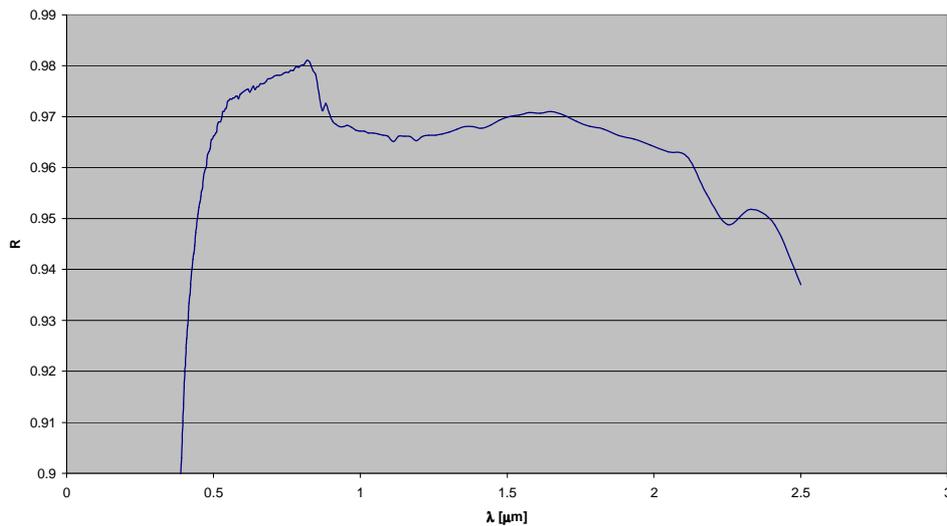
Come è facilmente intuibile i materiali, di cui sono composti i vari componenti CSP, svolgono una parte fondamentale ai fini del rendimento dell'impianto.

Come precedentemente affermato i vari materiali sono stati trattati, depositando su di essi più strati selettivi al fine di migliorare le caratteristiche richieste per ogni componente del collettore.

In seguito verranno descritte le varie parti e le caratteristiche richieste per svolgere al meglio la loro funzione.

## Specchio

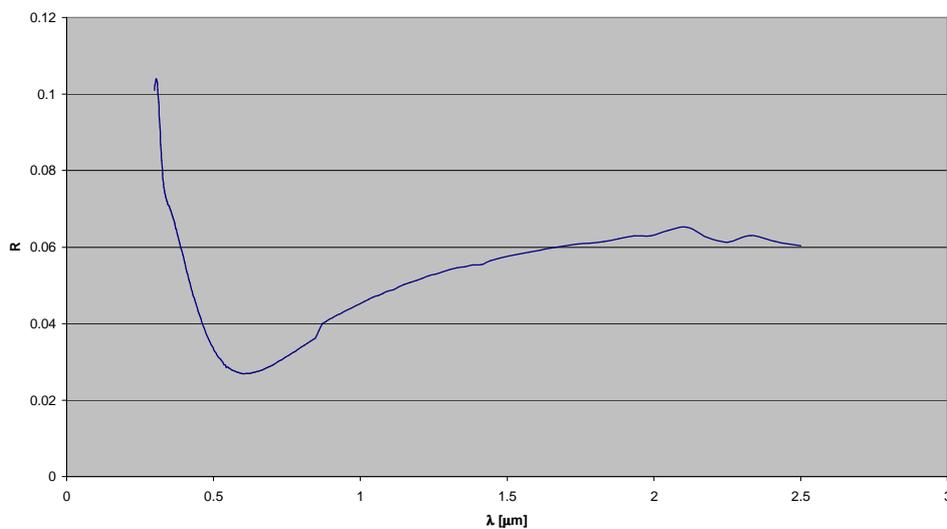
Lo specchio parabolico è costituito dal vetro Pilkington Microwhite 1.0 mm; su una delle facce del vetro è depositato uno strato di Argento, ricoperto poi dal trattamento protettivo Solarlux messo a punto dalla ditta Fenzi. Nel Grafico 2.1 è rappresentata la sua riflettanza in funzione della lunghezza d'onda, riportata per valori al di sopra di 0.9, per metterne meglio in evidenza l'andamento.



**Grafico 2.1** – Riflettanza specchio

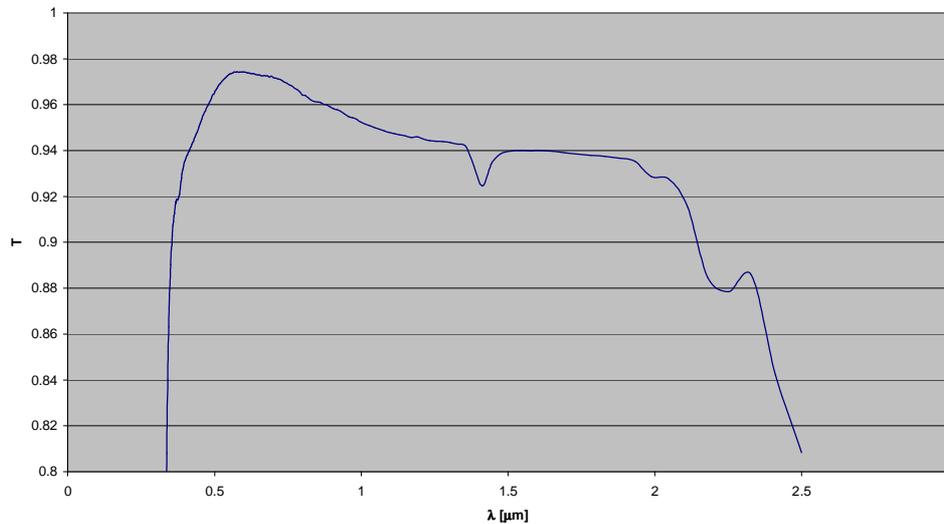
## Tubo vetro borosilicato

Il tubo di Vetro ha la funzione di isolare dall'ambiente esterno il tubo ricevitore e di mantenere al suo interno un vuoto (con pressione inferiore ad 1 Pa) sufficiente ad eliminare la perdita di calore per conduzione e convezione e per proteggere il coating selettivo del tubo centrale.



**Grafico 2.2** – Riflettanza tubo di vetro

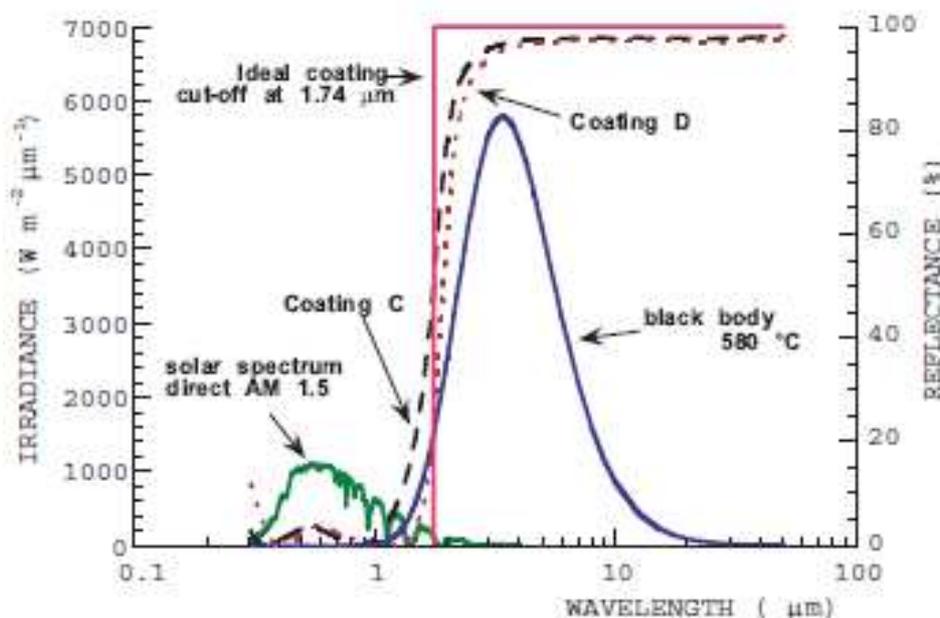
Esso presenta una elevata trasmittanza ottica ottenuta con trattamenti antiriflesso sulla superficie esterna ed interna. In seguito sono riportati il Grafico 2.2, raffigurante l'andamento della riflettenza spettrale, ed il Grafico 2.3, raffigurante l'andamento della trasmittanza spettrale.



**Grafico 2.3** – Trasmittanza tubo di vetro

### *Tubo Ricevitore*

Il tubo ricevitore è costituito da un substrato di acciaio AISI 316L ed da un coating selettivo di rivestimento, esposto nel capitolo 2.3, applicato sulla superficie esterna. Il tubo ricevitore deve avere un elevato assorbimento della radiazione incidente nella regione spettrale della radiazione solare (300 ÷ 2500 nm) e una emittanza prossima a zero nella regione dell'infrarosso, caratteristica dell'emissione di un corpo nero a  $T \cong 500^{\circ}\text{C}$ .

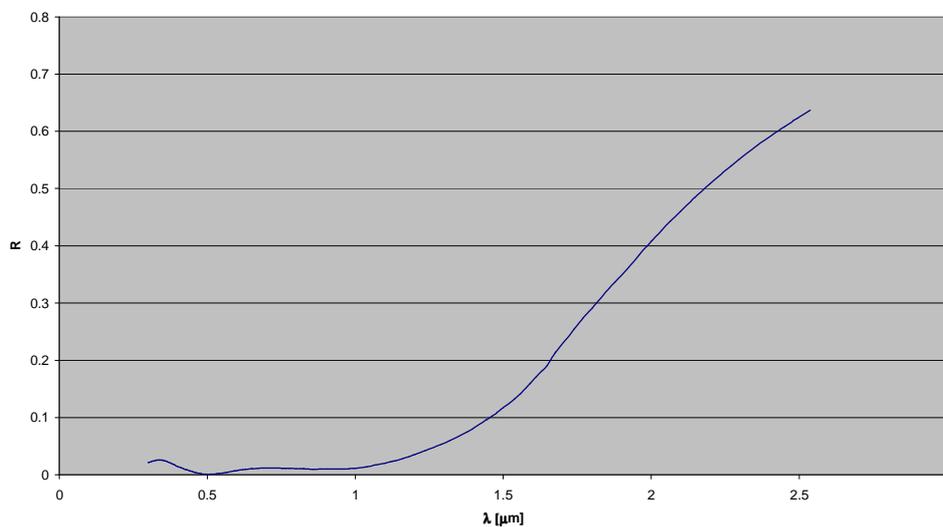


**Grafico 2.4** – Spettro di riflettenza di rivestimenti a base silica

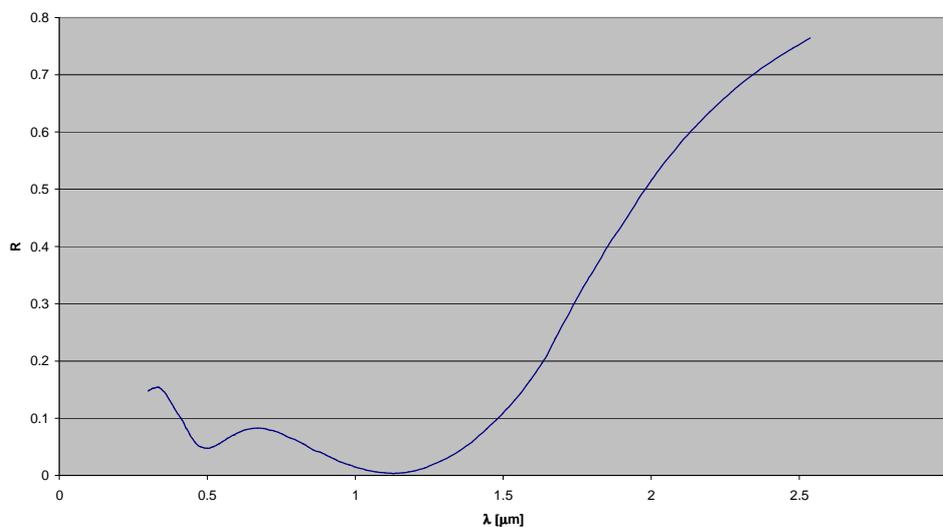
Una emittanza prossima allo zero corrisponde, per il teorema di Kirchhoff, ad un'assorbanza prossima a zero e di conseguenza ad una riflettanza prossima al 100% per la regione infrarossa.

Il grafico 2.4 mostra la curva di riflettanza spettrale del tubo ricevitore in tre modalità: la prima ideale a forma di gradino con la transizione a  $\lambda = 1.74 \mu\text{m}$  e le altre due corrispondenti ai due rivestimenti selettivi a base silica C e D. Nello stesso grafico è mostrato lo spettro standard della componente diretta del sole ad AM = 1.5 e la curva di emissione di un corpo nero a  $T = 580^\circ\text{C}$ . Le due, quella spettrale del sole e quella del corpo nero si intersecano intorno a  $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$ .

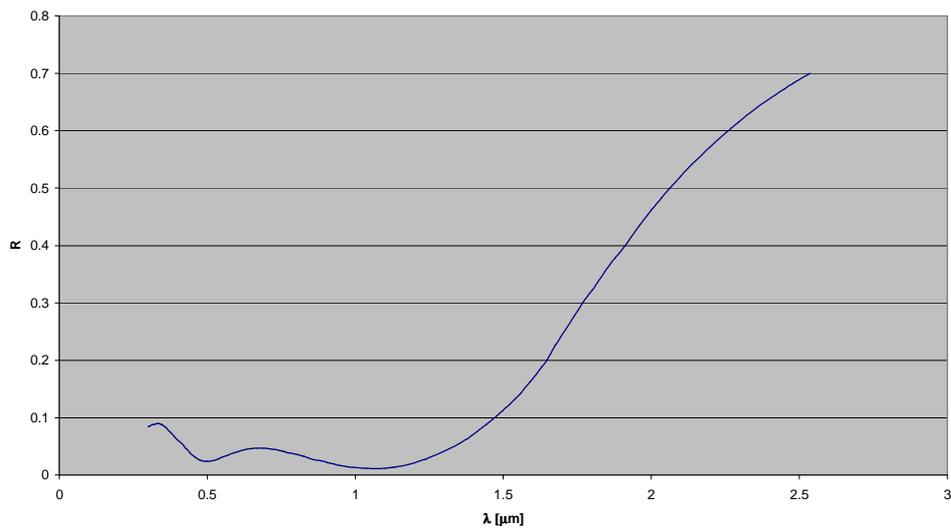
Nei grafici 2.5 – 2.7 a seguire sono riportate le curve di riflettanza del tubo ricevitore per un angolo d'incidenza di  $45^\circ$ . Essi rappresentano rispettivamente la riflettanza per la luce polarizzata P, parallela, e S, ortogonale, e per la luce non polarizzata.



**Grafico 2.5** - Riflettanza per luce polarizzata Parallela tubo ricevitore



**Grafico 2.6** - Riflettanza per luce polarizzata Perpendicolare tubo ricevitore



**Grafico 2.7** - Riflettanza con grado d'incidenza di 45° tubo ricevitore

Gli allegati con il foglio di calcolo Excel per tutte le curve presentate ( Grafici 2.1 - 2.7 ) sono contenuti nell'allegato "Allegato digitale A – Indici".

## **Capitolo 3: Descrizione sintetica delle funzionalità e degli obiettivi dell'apparecchio**

### ***3.1 Principio di funzionamento***

Lo strumento, a forma di collare, si applica concentricamente ad un estremo del tubo ricevitore del collettore solare. Azionandolo tramite Bluetooth da computer remoto, il radiometro inizia a spostarsi lungo il tubo con moto elicoidale. Grazie a tale tipo di moto, i due sensori principali, costituiti da celle fotovoltaiche, effettuano la misurazione della luce che colpisce il ricevitore (celle esterne) e la luce persa o non captata dallo stesso (celle interne), generando una sorta di mappatura. I dati così misurati vengono inviati in tempo reale tramite bluetooth al computer remoto, il quale provvederà a raccogliarli ed analizzarli. Da tale analisi sarà possibile stabilire quanta energia viene effettivamente raccolta dal ricevitore e se vi sono anomalie nella superficie degli specchi concentratori.

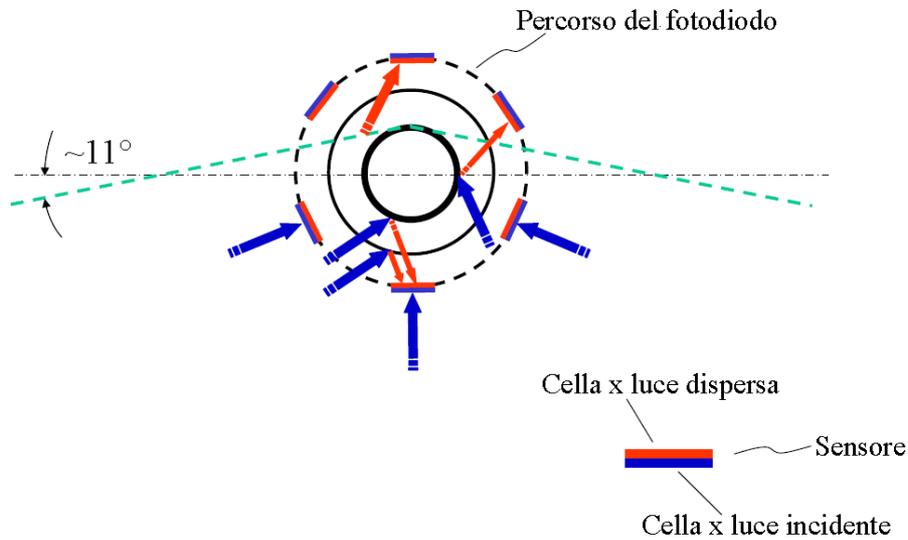
Ogni rilevamento, opportunamente adattato e convertito in un segnale leggibile da parte della centralina, è costituito da quattro informazioni:

- intensità luminosa derivante dalla cella solare;
- temperatura delle celle derivante dalle termoresistenze (pressoché isoterme alle celle);
- inclinazione del radiometro fornita dal sensore d'inclinazione di bordo (inclinometro);
- distanza dal punto di partenza ricavata tramite opportuno algoritmo dal numero di giri compiuti dal motore e rilevati tramite l'encoder montato su di esso;

Il software presente sul computer remoto d'acquisizione utilizzerà le prime due informazioni per calcolare la reale intensità luminosa rilevata, mentre le informazioni relative a distanza ed inclinazione verranno utilizzate per individuare e mappare la posizione relativa alla misura.

Il radiometro trasmetterà al computer remoto sei rilevamenti simultaneamente per ogni campionamento della centralina, dei quali tre relativi alla misura delle celle esterne e tre relativi alle celle interne. Lo sfalsamento delle celle lungo l'asse del ricevitore evita ridondanza nelle misurazioni.

Il principio di funzionamento del radiometro mobile è mostrato schematicamente in Figura 3.1.



**Figura 3.1** - Principio di funzionamento del radiometro a collare mobile.

In Figura 3.1 la luce (blu) proveniente dal basso è quella solare riflessa dallo specchio parabolico. La luce incidente (blu) è in parte riflessa dal tubo di vetro, in parte dal tubo metallico (il ricevitore vero e proprio) e in parte è trasmessa senza intercettare il ricevitore. Questo tipo di luce è indicata nella Figura 3.1 con il colore rosso.

Il tubo del ricevitore è attorniato da un sensore, visto in diverse posizioni angolari, che percorre una traiettoria circolare attorno ad esso su una superficie detta superficie virtuale. Il sensore è costituito da una coppia (sandwich) di celle solari, accoppiate sulla faccia non attiva otticamente, una rivolta verso l'esterno, ovvero verso gli specchi del collettore solare (colore blu), ed una rivolta verso l'interno, ovvero verso il tubo ricevitore (colore rosso). Nella sua rotazione attorno al tubo ricevitore, il sensore percorre una traiettoria elicoidale che, se vista lungo l'asse del tubo, appare circolare come mostrato in Figura 3.1.

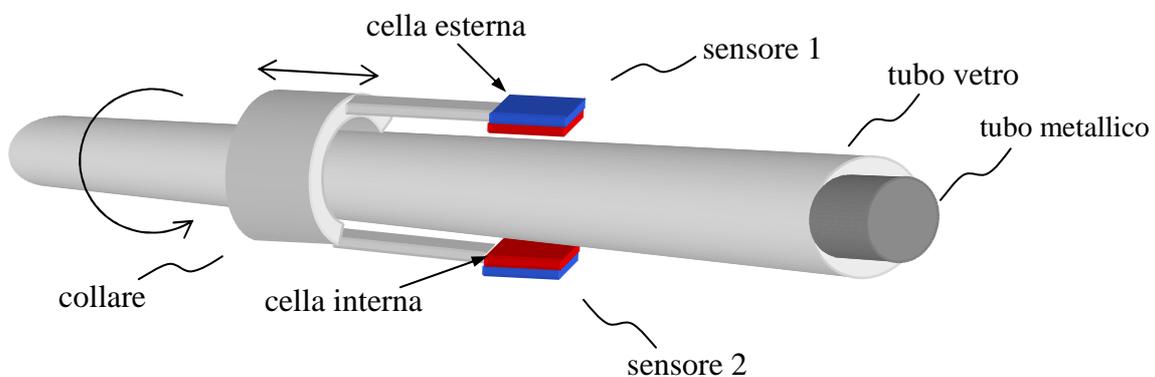
La traiettoria elicoidale serve a monitorare diverse posizioni longitudinali al tubo, ma per il momento possiamo trascurarle. La traiettoria circolare del sensore sul piano della figura individua una superficie cilindrica che supponiamo al momento sia la stessa per la cella esterna (blu) e la cella interna (rossa). La radiazione proveniente dagli specchi del collettore primario, in condizioni di perfetto allineamento, è radiale all'asse ottico del sistema e quindi è diretta verso il centro del tubo ricevitore.

In Figura 3.1 la radiazione incidente è rappresentata da frecce diversamente orientate per effetto dell'inevitabile disallineamento degli specchi o per una loro deformazione rispetto al profilo ideale.

La radiazione incidente che transita in prossimità del tubo ricevitore è intercettata dalla cella esterna (blu) (la luce che non è intercettata dalla cella esterna risulta comunque luce persa, ma è altamente improbabile in quanto sarebbe conseguenza di un forte disallineamento degli specchi), mentre la radiazione che non è intercettata dal tubo ricevitore, oppure che è riflessa da quest'ultimo (che sia il tubo in vetro o il tubo metallico), viene intercettata dalla cella solare interna (rossa). Nel suo moto circolare attorno al tubo, perciò, la cella solare esterna intercetta tutta la luce incidente, mentre la cella solare interna intercetta tutta la luce persa.

Il flusso solare netto assorbito dal tubo ricevitore è allora dato dalla differenza tra le due misure, con una lieve imprecisione dovuta al fatto che il tubo di vetro assorbe una piccola parte della luce solare incidente; quindi il flusso assorbito calcolato è lievemente sovrastimato. Però anche il flusso assorbito dal vetro può essere stimato attraverso una semplice simulazione, conoscendo l'assorbanza spettrale del materiale. Per avere una stima corretta del flusso assorbito dal ricevitore (tubo metallico) è necessario che le due celle solari siano molto ravvicinate e che la loro temperatura sia monitorata accuratamente.

La Figura 3.2 mostra lo schema semplificato del radiometro mobile o collare mobile in una vista prospettica. Esso è costituito da una parte (corpo del collare) che serve a trascinare il radiometro lungo il tubo e contemporaneamente a ruotare il sensore attorno ad esso.

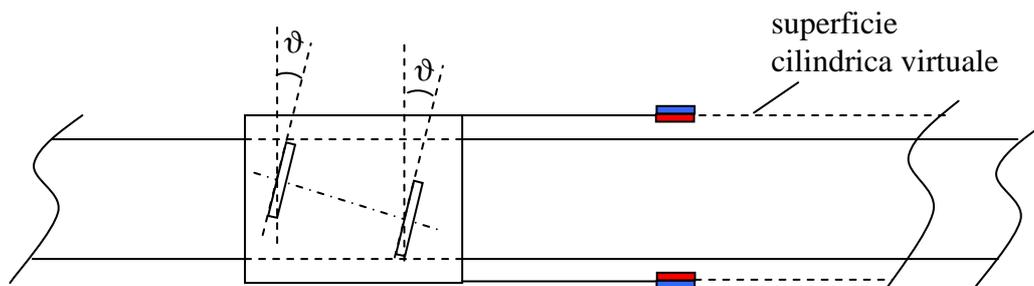


**Figura 3.2** - Schema semplificato del radiometro a collare mobile in una vista prospettica

In Figura 3.2 sono disegnati due sensori anziché uno, in quanto due sensori si bilanciano meglio e inoltre permettono di ridurre la velocità angolare dei sensori a parità di velocità di trascinamento, ovvero permettono di aumentare la velocità di trascinamento a parità di velocità angolare. Il vantaggio di avere due sensori contrapposti sta anche nel fatto che essi non interferiscono tra loro. Per avere il moto traslazionale del collare lungo il tubo e quello rotazionale dei sensori, si potrebbe immaginare un collare con i due movimenti separati. Questo comporterebbe di realizzare due parti,

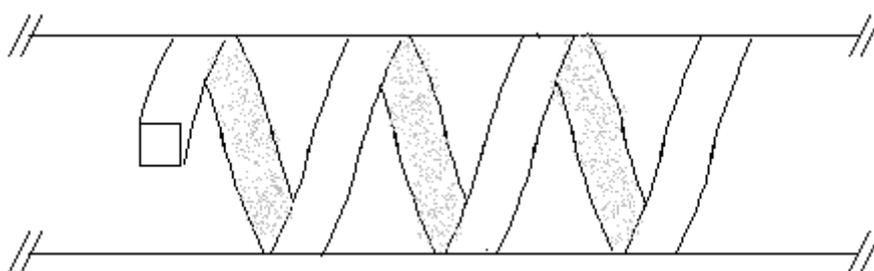
il corpo del collare e i sensori, in moto tra loro, il che comporterebbe di realizzare contatti striscianti per trasferire i segnali elettrici dai sensori al collare. In realtà è possibile realizzare un solo movimento elicoidale che consente di avere un corpo unico in movimento.

Per illustrare meglio come è realizzato il moto elicoidale del collare, facciamo riferimento alla Figura 3.3, in cui è mostrata una coppia di ruote solidali con il corpo del collare e sfalsate di un angolo  $\vartheta$  rispetto alla normale all'asse del tubo.



**Figura 3.3** - Orientamento delle ruote per il trascinamento del collare

Il collare è previsto di tre coppie di ruote di questo tipo. La rotazione delle coppie di ruote fa sì che l'intero collare con i due sensori ruoti attorno al tubo e contemporaneamente trasli rispetto ad esso. Il moto elicoidale dei sensori individua una superficie cilindrica virtuale e determina la tracciatura della superficie come mostrato in Figura 3.4.



**Figura 3.4** - Traccia elicoidale di un singolo sensore sulla superficie cilindrica virtuale

Per tracciare completamente la superficie virtuale, è necessario allora che il secondo sensore ricopra la superficie lasciata vuota dal primo. In alternativa si possono usare  $N$  sensori. Se  $\vartheta$  è l'angolo d'inclinazione delle ruote ed  $L$  è il lato della cella quadrata, avremo che la traccia lasciata dalla cella sulla superficie cilindrica avrà uno spessore lungo la traccia pari a  $L \cdot (\sin \vartheta + \cos \vartheta)$  e uno spessore lungo l'asse ottico pari a  $L \cdot (1 + \tan \vartheta)$ .

Indicando con  $f = 1/T$  la velocità di rotazione del sensore in giri/sec e con  $v$  la velocità di traslazione o trascinamento del sensore, avremo che, dopo ogni giro completo, il sensore sarà stato

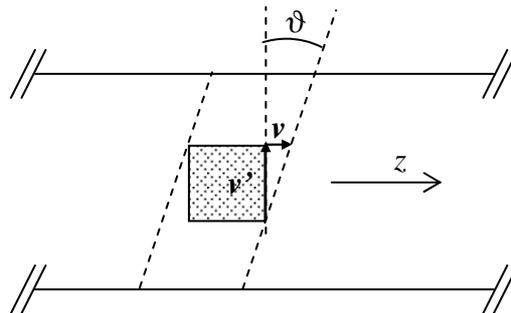
traslato del tratto  $v \cdot T = v / f$ . Per coprire tutta la superficie virtuale con  $N$  sensori senza avere sovrapposizioni né zone lasciate scoperte, è allora necessario traslare il sensore di un tratto pari a:  $v \cdot T = v / f = N \cdot L \cdot (1 + \tan \vartheta)$ .

Il valore di  $\vartheta$  si ottiene considerando le due componenti della velocità della cella:  $v$  lungo la direzione dell'asse ottico e  $v'$  lungo la direzione ortogonale a questo (vedi Figura 3.5). La velocità  $v' = 2\pi R f$ , dove  $R$  è il raggio del cilindro virtuale, e quindi  $\tan \vartheta = v / v' = v / 2\pi R f$ .

Il dimensionamento preciso delle velocità di traslazione e rotazione conviene farlo fissando la velocità di rotazione massima che assicuri delle condizioni di stabilità meccanica a tutta la struttura e poi ricavare da questa la velocità di traslazione più appropriata.

Se si vuole una mappatura completa della superficie cilindrica virtuale dovrà essere:

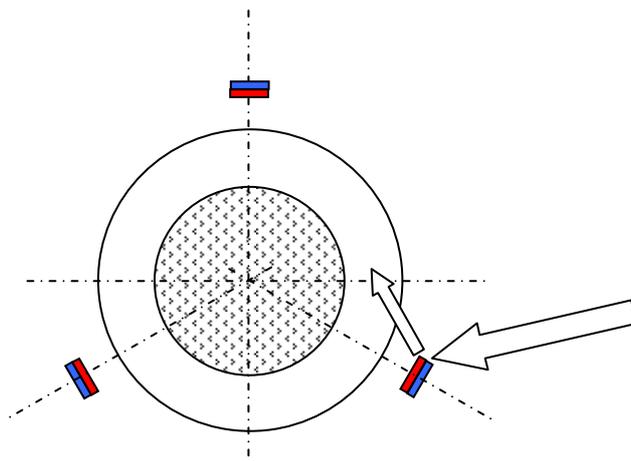
$$v = f L N \cdot \frac{2\pi R}{(2\pi R - L N)} \quad \text{Equazione 3.1}$$



**Figura 3.5** - Componenti della velocità della cella nel moto elicoidale

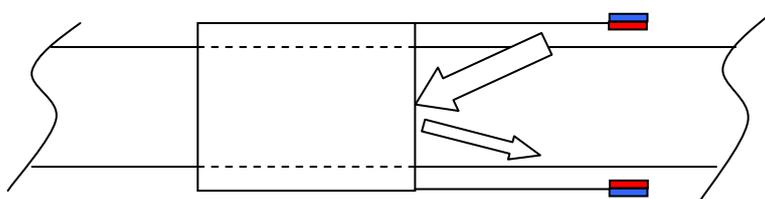
La velocità  $v$  può essere minore del valore dell'Equazione 3.1 qualora si voglia sovrapporre le tracce sacrificando la rapidità della misura ma migliorando la risoluzione, oppure potendo anche essere  $v$  maggiore del valore dell'Equazione 3.1 qualora si voglia rendere le tracce lasche sacrificando la risoluzione della misura ma effettuando la misura più velocemente. Usando  $N$  sensori, essi saranno disposti a  $360/N^\circ$  uno dall'altro (vedi esempio in Figura 3.6).

L'uso di più di due sensori comporta però il rischio che riflessi spuri del fascio concentrato da parte di un sensore siano diretti verso un secondo sensore. Questo tipo di interferenza si può evitare realizzando i sensori con un materiale assorbente, oppure riflettente diffusivo.



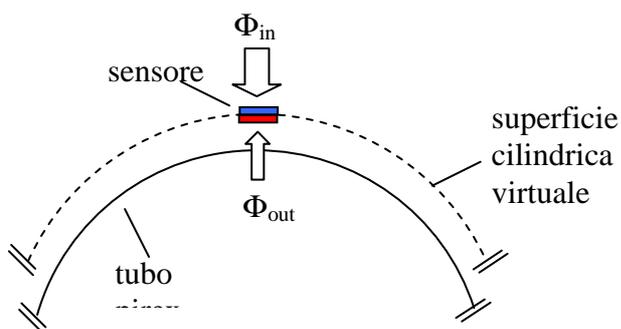
**Figura 3.6** - Possibile interferenza ottica tra due sensori

Una simile interferenza si potrebbe verificare tra il corpo del collare ed un sensore (vedi Figura 3.7). Anche in questo caso si può evitare l'interferenza realizzando il corpo del collare con un materiale assorbente o riflettente diffusivo.



**Figura 3.7** – Possibile interferenza ottica tra il corpo del collare ed un sensore

Come è stato già detto, ogni sensore comprende due fotorivelatori, o celle solari, rivolte in direzioni opposte e tali da misurare l'una il flusso diretto verso il ricevitore e l'altra il flusso diretto verso lo specchio parabolico. I due fotorivelatori sono posizionati molto vicini in modo da rilevare il flusso diretto sulla stessa porzione di area nelle due direzioni opposte (vedi Figura 3.8).



**Figura 3.8** - Schema della misura del flusso con un sensore

Lo scopo della misura è quello di misurare il flusso che attraversa la superficie cilindrica virtuale e quindi è necessario che il fotorivelatore abbia una superficie piana e che sia un assorbitore perfetto ovvero che la sua risposta non dipenda dalla direzione d'incidenza della luce. Celle solari di alta efficienza al Silicio cristallino possono essere realizzate in questo modo [4]. Esse hanno il vantaggio di essere sottili e quindi è possibile unirle lasciando soltanto lo spazio per inserire una o due termocoppie (vedi Figura 3.9).



**Figura 3.9** - Due celle solari ( $cs_1$  e  $cs_2$ ) sono accoppiate sulla parte posteriore e tra loro è inserita una termocoppia comune oppure una termocoppia per ciascuna cella

Un secondo requisito richiesto ai sensori è di essere posizionati molto vicino al tubo di vetro; questo per far sì che la misura del flusso simuli il più possibile il flusso assorbito dalla zona del tubo ricevitore su cui è posizionato il sensore. Se  $A_{cs}$  è l'area attiva della cella solare e  $\Phi_{in}$ ,  $\Phi_{out}$  sono i flussi incidente e perso rispettivamente, il flusso netto che attraversa l'area  $A_{cs}$  nel punto caratterizzato dalla coordinata  $z$  (lungo il tubo) e dall'angolo  $\vartheta$  sarà:

$$\Phi_{abs}(z, \vartheta) = \Phi_{in}(z, \vartheta) - \Phi_{out}(z, \vartheta) \quad (4) \quad \text{Equazione 3.2}$$

e la corrispondente irradianza sarà:

$$E_{abs}^V(z, \vartheta) = \Phi_{abs}^V(z, \vartheta) / A_{CS} \quad \text{dove il suffisso v indica "virtuale"} \quad \text{Equazione 3.3}$$

Se  $R_V$  è il raggio del cilindro virtuale e  $R_R$  è il raggio del tubo ricevitore, possiamo allora ipotizzare che in condizioni di allineamento perfetto specchio/ricevitore l'irradianza netta sul ricevitore  $E_{abs}^R$  sia data da:

$$E_{abs}^R(z, \vartheta) = E_{abs}^V(z, \vartheta) \cdot \left( \frac{R_V}{R_R} \right) = \left( \frac{\Phi_{abs}^V(z, \vartheta)}{A_{CS}} \right) \cdot \left( \frac{R_V}{R_R} \right) \quad \text{Equazione 3.4}$$

Se chiamiamo con  $\theta$  il semiangolo con cui è vista la cella quadra dall'asse ottico, avremo:

$$A_{CS} = (2R_V \cdot \sin \theta)^2 = 4R_V^2 \cdot \sin^2 \theta \quad \text{Equazione 3.5}$$

e quindi  $E_{abs}^R$  diventa:

$$E_{abs}^R = E_{abs}^R(z, \vartheta) = \frac{\Phi_{abs}^V(z, \vartheta)}{4R_V^2 \sin^2 \theta} \cdot \left( \frac{R_V}{R_R} \right) = \frac{\Phi_{abs}^V(z, \vartheta)}{4R_R R_V \sin^2 \theta} \quad \text{Equazione 3.6}$$

e quindi  $E_{abs}^R(z, \vartheta)$  rappresenta proprio la mappa della densità di flusso assorbito dal tubo ricevitore. L'integrale di  $E_{abs}^R(z, \vartheta)$  su  $(z, \vartheta)$  permette di stimare il flusso totale assorbito da un tratto del tubo.

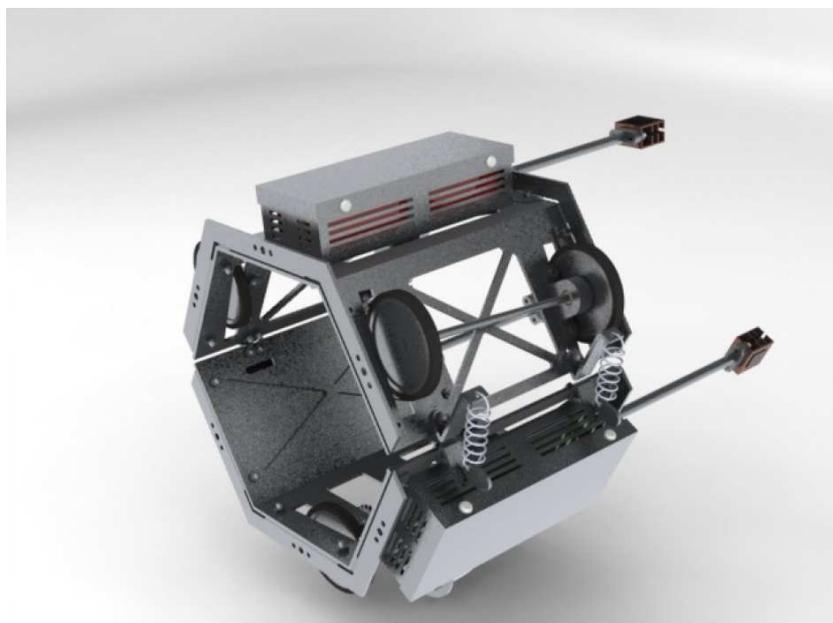
L'efficienza di collezione o raccolta della luce da parte di un punto del ricevitore sarà data da:

$$\eta_{abs}^R(z, \vartheta) = \frac{\Phi_{abs}^V(z, \vartheta)}{\Phi_{in}^V(z, \vartheta)} \quad \text{Equazione 3.7}$$

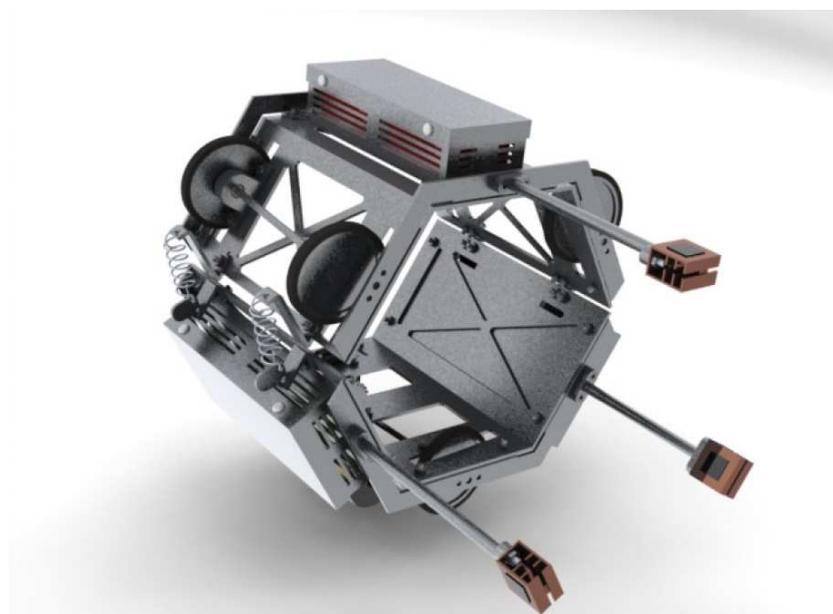
mentre l'efficienza di collezione di un tratto del tubo si otterrà integrando la grandezza  $\eta_{abs}^R(z, \vartheta)$  su  $(z, \vartheta)$ . La misura del flusso fatta con una cella solare potrebbe avere qualche inconveniente per effetto del riscaldamento della cella stessa, anche se, da una parte questo effetto è mitigato dal movimento rotatorio del sensore, dall'altra la misura della temperatura con la termocoppia o con il termoresistore ci permette di misurare la sua temperatura.

### **3.2 Descrizione dell'apparecchio e sue parti**

Il radiometro si presenta come nei seguenti rendering:



**Figura 3.10** – Vista del Radiometro privo di schermo protettivo



**Figura 3.11** – Vista del Radiometro privo di schermo protettivo

## *Telaio*

Il telaio della struttura è composto da due elementi con forma di semi-gusci a profilo semi-esagonale. Al fine di contenere il peso, tali elementi sono ampiamente scavati e dotati di nervature centrali di rinforzo. Sulla loro superficie sono altresì presenti numerosi fori e intagli necessari al montaggio su di essi della componentistica. Questi due semigusci hanno lo scopo di fungere come base per il montaggio di tutta la restante componentistica. Si distinguono tra loro per disposizione e numero di fori e intagli, in quanto il guscio superiore è incaricato di ospitare, oltre a varia componentistica, la batteria e i due treni di ruote. La parte inferiore è invece incaricata di ospitare, oltre ad altra componentistica, un treno di ruote (treno motore) ed il motore stesso per la movimentazione del radiometro.

## *Rinforzi*

Esternamente al telaio, alle estremità, sono presenti dei rinforzi fissati tramite bulloni. Tali rinforzi, che seguono l'andamento esagonale del telaio hanno due funzioni principali:

- Fungono da supporto ai sensori;
- Aumentano la resistenza flessionale delle due piattaforme, che essendo molto sottili ed a sezione aperta, tenderebbero a piegarsi a causa degli sforzi dovuti ai supporti ruota, cerniere e chiusura.

## *Supporti ruota*

Al telaio sono collegati tramite bulloni 6 supporti ruota, di cui ogni coppia sostiene un treno di ruote. Tali supporti hanno il compito di vincolare gli alberi dei treni ruota al telaio. Presentano un foro svasato per l'alloggiamento di un cuscinetto a strisciamento (bronzina) per evitare il contatto diretto con l'albero.

## *Alberi dei treni ruota*

Alle estremità di tali alberi sono presenti le due ruote. Due di essi sono condotti e montano ruote il cui scopo è di garantire appoggio al tubo in vetro e quindi il centraggio del radiometro su quest'ultimo. Il terzo monta invece le ruote motrici, che oltre a garantire appoggio hanno anche il

compito trasmettere una coppia al tubo in modo da far ruotare lo strumento. Hanno tutti ugual diametro in quanto, sebbene l'albero motore sia più sollecitato dovendo supportare anche uno sforzo di torsione oltre che di flessione rotante, dai calcoli è emerso, vista la ridotta entità di tale sforzo, un diametro di pochissimo superiore al diametro minimo necessario agli alberi condotti. Le ruote sono posizionate alle estremità di tali alberi, bloccate su di essi tramite accoppiamento con interferenza per garantire un bloccaggio sicuro e al contempo evitare lo snervamento del materiale. Tale interferenza viene ottenuta tramite tolleranza dimensionale. L'albero motore monta anche la ruota dentata condotta, calettata su di esso sempre con interferenza idonea a trasferire la coppia massima del motore.

#### *Riporti in acciaio calettati sull'albero*

Sono anelli in acciaio con buona finitura superficiale sul lato esterno. Tali componenti sono calettati tramite accoppiamento con interferenza sull'albero nelle posizioni corrispondenti alle sedi dei supporti ruota. Hanno lo scopo di ruotare a contatto con le boccole fissate sui supporti ruota al posto dell'albero stesso, il quale è realizzato in un materiale non idoneo allo strisciamento.

#### *Cerchi ruota*

La parte centrale delle ruote è forata centralmente per potersi accoppiare agli alberi. Il foro è dimensionato per garantire un accoppiamento con interferenza sull'albero.

#### *Rivestimento esterno delle ruote*

Da montare esternamente al mozzo centrale delle ruote, e realizzato in gomma siliconica per via delle note proprietà del materiale. L'accoppiamento è realizzato per interferenza (sfruttando l'elasticità tipica di tale materiale) ed è ulteriormente garantito dall'incollaggio sullo stesso mediante colla siliconica.

#### *Cerniere*

Le due semi-metà del telaio sono collegate e vincolate tra loro tramite due cerniere ad un grado di libertà (rotazione attorno al proprio asse) che permettono l'apertura dell'apparecchio per il montaggio. Sono posizionate entrambe su un lato del corpo del radiometro e vincolate tra loro

mediante un perno bloccato tramite anelli d'arresto radiali, e collegate ai due semigusci tramite bulloni.

### *Sistemi di chiusura*

Le due semi-metà del telaio sono dotate (e collegate una volta montato lo strumento) di due chiusure a molla.

Tali sistemi, posizionati entrambi sul lato dell'apparecchio opposto a quella su cui sono montate le cerniere, si compongono ciascuno di due staffe, una molla e un gancetto.

La molla, opportunamente dimensionata, si aggancia in un estremo alla staffa superiore, ed all'altro estremo al gancetto. Il suo scopo è quello di garantire un pre-carico una volta montato lo strumento, necessario a garantire l'attrito delle ruote motrici alla superficie in Vetro, e a contrastare la forza centrifuga che, una volta azionato lo strumento, porterebbe a distaccare le due semimeta.

### *Sostegni sensori*

Tali organi sono montati a sbalzo sui rinforzi tramite bulloni. Si compongono di diversi elementi: una staffa di collegamento ai rinforzi, un'asta di collegamento, una staffa di collegamento del supporto in rame e il supporto in rame stesso. Hanno il compito di sorreggere e mantenere in posizione i sensori stessi (celle solari e termoresistenze). La staffa di collegamento ai rinforzi è collegata a questi ultimi tramite bulloni, e presenta un foro centrale atto ad alloggiare un'estremità dell'asta di collegamento.

La staffa di collegamento al supporto in rame è del tutto identica alla staffa di collegamento ai rinforzi, ed alloggia l'altra estremità dell'asta di collegamento.

L'asta di collegamento è un tubo cavo che funge da collegamento tra il corpo del radiometro e il sostegno in rame, essendo quest'ultimo montato a sbalzo. Oltre alla funzione di sostegno, svolge anche l'importante compito di far passare al proprio interno i cavi provenienti dalle celle solari e dalle termoresistenze, riparandoli così dalla luce solare concentrata ed evitando loro di spostarsi durante il movimento.

Sulle facce esterne dei supporti di rame, ai suoi due lati paralleli, vengono montate tramite incollaggio le celle solari. Sulle facce interne sono ricavate delle alette di raffreddamento per dissipare il calore assorbito una volta in funzione, e dannoso per le celle. Sul lato interno, concentricamente ad uno dei due fori per l'imbullonamento, viene montata la termoresistenza, la cui estremità presenta un occhiello di fissaggio.

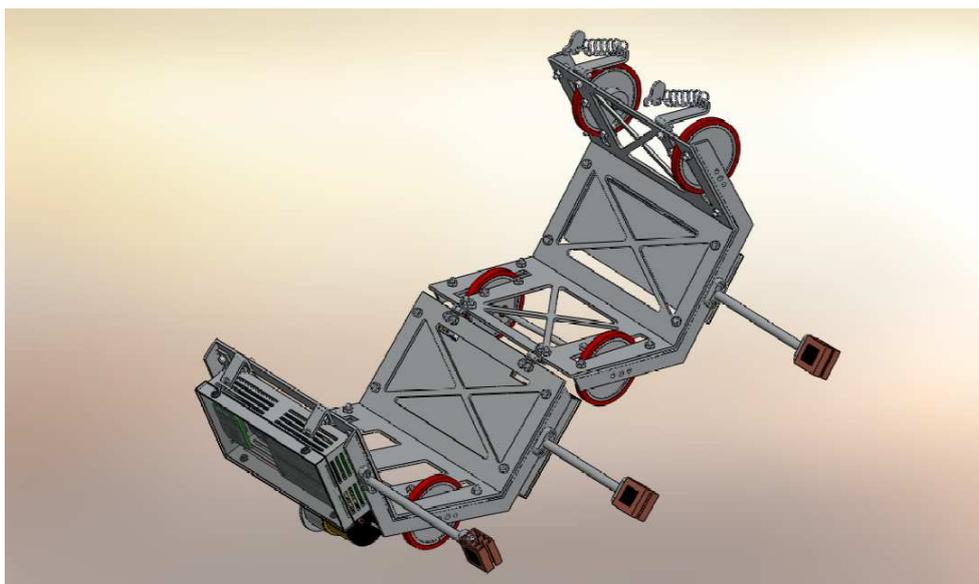
## *Scatole elettriche*

Sono tre scatole in lamierato sottile con la funzione di contenere e proteggere dalla luce solare concentrata le varie schede elettroniche e la batteria.

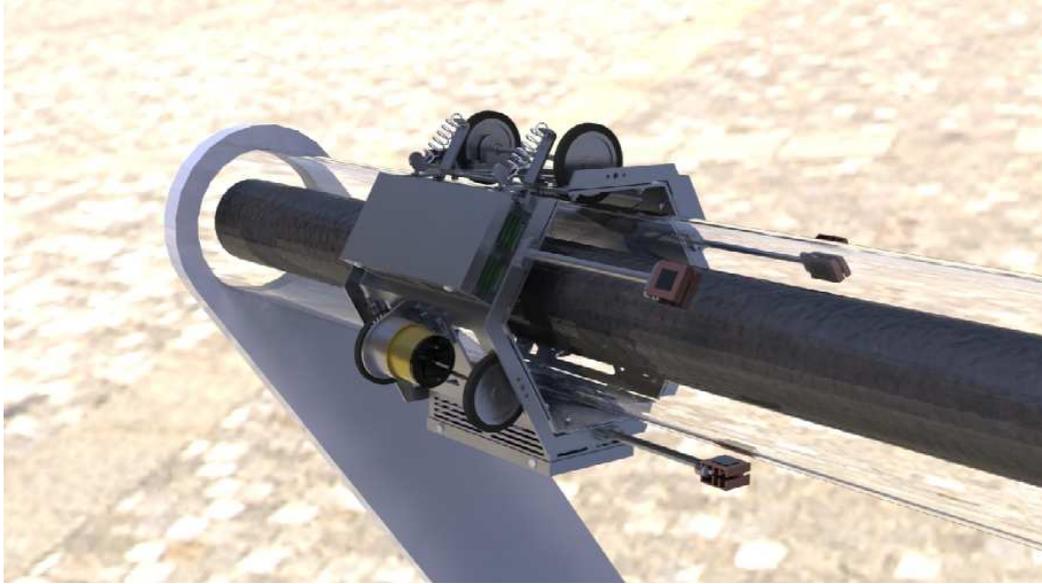
### **3.3 Montaggio del radiometro sul collettore**

Una volta portata la parabola in posizione di riposo col tubo ricevitore rivolto in basso, l'apparecchio andrà aperto (Figura 3.3) e posizionato attorno a quest'ultimo a ridosso di uno dei due estremi (Figura 3.4). L'appoggio generato dalle ruote sulle superficie in Vetro assicurerà un centraggio automatico del radiometro. Si provvederà poi al bloccaggio del radiometro agganciando nelle apposite sedi i ganci del sistema di chiusura. terminate le operazioni di fissaggio si procederà a riportare il collettore solare in posizione di funzionamento, ed infine si inizierà la misurazione facendo partire lo strumento tramite un comando di start dal computer remoto. Terminata la mappatura, una volta giunto a ridosso dell'estremo opposto del ricevitore il radiometro si arresterà grazie al sensore di posizione. Sarà quindi possibile, previo abbassamento del gruppo collettore, eseguire il suo smontaggio, ed eventualmente il montaggio sul collettore successivo per eseguire un'altra misurazione.

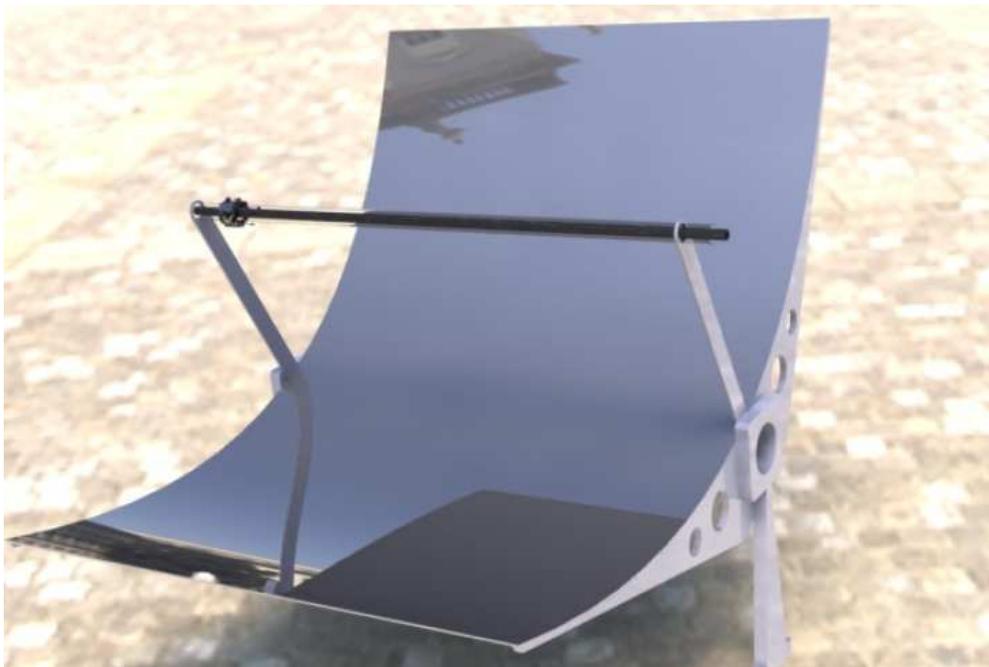
L'apparecchio, una volta in posizione, si presenterà come nel rendering in Figura 3.5.



**Figura 3.12** – Vista del radiometro aperto



**Figura 3.13** – Vista del radiometro montato sul tubo di vetro



**Figura 3.14** – Panoramica del radiometro montato sul collettore

## **Capitolo 4: Descrizione degli strumenti utilizzati per la modellazione ottica**

L'ottica è la parte della fisica che descrive il comportamento e le proprietà delle radiazioni elettromagnetiche e l'interazione di queste con la materia.

L'ottica affronta quelli che sono chiamati i fenomeni ottici, evento risultate dall'interazione di radiazioni elettromagnetiche e materia, da un lato per spiegarli e dall'altro per ottenere risultati sperimentali che le consentano di crescere come disciplina fenomenologica e modellistica.

Esistono tre tipi di ottica:

1. *geometrica*: studio dei fenomeni ottici assumendo che la radiazione elettromagnetica si propaghi mediante raggi rettilinei;
2. *fisica*: studio dei fenomeni di diffrazione, interferenza, polarizzazione delle radiazioni elettromagnetiche e tutte quei fenomeni per i quali non sono valide le ipotesi assunte dall'ottica geometrica;
3. *quantistica*: studio dell'interazione delle radiazioni elettromagnetiche con la materia dal punto di vista della meccanica quantistica.

Nel nostro caso andremo ad affrontare uno studio sulla fenomenologia ottica geometrica sui concentratori. Dapprima analizzeremo il comportamento ottico delle varie parti del concentratore solare che ci interessano, specchio parabolico, tubo di vetro e tubo ricevitore; in un secondo momento si provvederà a capire le eventuali interferenze indotte dell'utilizzo del radiometro applicato alla struttura.

### **4.1 TracePro**

Per eseguire questo studio si utilizzerà un software commerciale che permette di eseguire simulazioni di sistemi ottici. Il software è TracePro, prodotto dalla Lambda Research Corporation. TracePro integra la modellazione solida e la modellazione ottica fornendo accurate analisi ottiche. TracePro esegue analisi di sistemi di illuminazione ed ottici simulando la polarizzazione, la diffusione, l'assorbimento, la diffrazione, la riflessione e la rifrazione dei raggi luminosi.

Mediante opportune analisi numeriche è infatti in grado di calcolare:

- l'irraggiamento, l'intensità, il flusso e la distribuzione spettrale;
- raggi deviati, la luce diffusa e l'apertura dovuta alla diffrazione;
- distribuzioni della luce in sistemi di visualizzazioni;
- effetti di polarizzazione;
- la diffusione e la propagazione in tessuti biologici;
- l'elaborazione di immagini in colori reali.

TracePro inoltre dà la possibilità di creare i modelli solidi direttamente nell'ambiente CAD e di utilizzare un'ampia libreria di componenti ottici, oppure d'importare i dati geometrici da software CAD esterni.

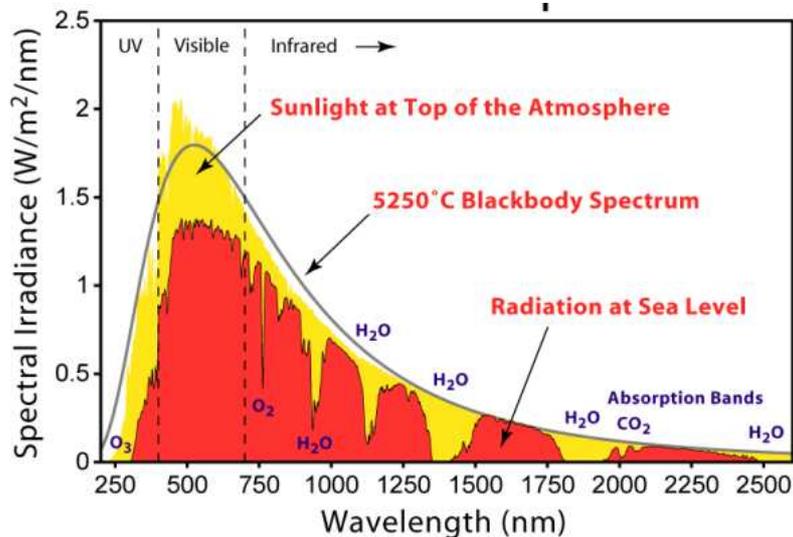
TracePro utilizza il più avanzato ed efficiente algoritmo per la simulazione ottica. Il metodo Monte Carlo, motore del software, effettua l'analisi della propagazione dei raggi luminosi in modo discreto e statistico, simulando in maniera accurata la diffrazione e la diffusione della luce in maniera non sequenziale. E' possibile impostare la campionatura dei raggi un funzione dell'accuratezza e delle zone che si vogliono analizzare, ottimizzando il rapporto tra velocità di calcolo e precisione dei risultati.

I raggi luminosi possono essere visualizzati ed analizzati in funzione di come raggiungono le superfici selezionate. Le mappe di irraggiamento consentono la rappresentazione dei flussi allo stesso modo di come appaiono in una analisi fotometrica. Un elenco dei flussi e dei raggi incidenti, unitamente alla storia dei singoli raggi sono dati essenziali per capire dove la luce è stata assorbita, persa o diffusa, riflessa o rifratta.

### *La radiazione Solare*

Come conseguenza delle reazioni nucleari che avvengono all'interno del sole, questo irradia isotropicamente nello spazio la radiazione elettromagnetica il cui spettro in lunghezza d'onda corrisponde a quella dell'emissione di un corpo nero avente temperatura pari a 5780 K. La potenza irradiata è enorme, stimabile in poco meno di  $4 \cdot 10^{26}$  W, corrispondente a circa  $60 \text{ MW/m}^2$ ; quella che attraversa una data superficie (per comodità pensiamo ad un pannello piano posizionato al di fuori dell'atmosfera terrestre) dipende dalla sua dimensione (area), dalla distanza dall'astro ed infine dall'orientazione rispetto a quest'ultimo.

Precisamente per i motivi spiegati sopra, per simulare il Sole all'interno del software TracePro si è utilizzato un solido, la cui superficie emette come un corpo nero. Nella figura 4.1 è raffigurato lo spettro solare misurato al top dell'atmosfera e sulla superficie terrestre confrontato con quello di un corpo nero a  $T = 5250^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.1** – Spettro dell'irradianza solare e del corpo nero in funzione della lunghezza d'onda

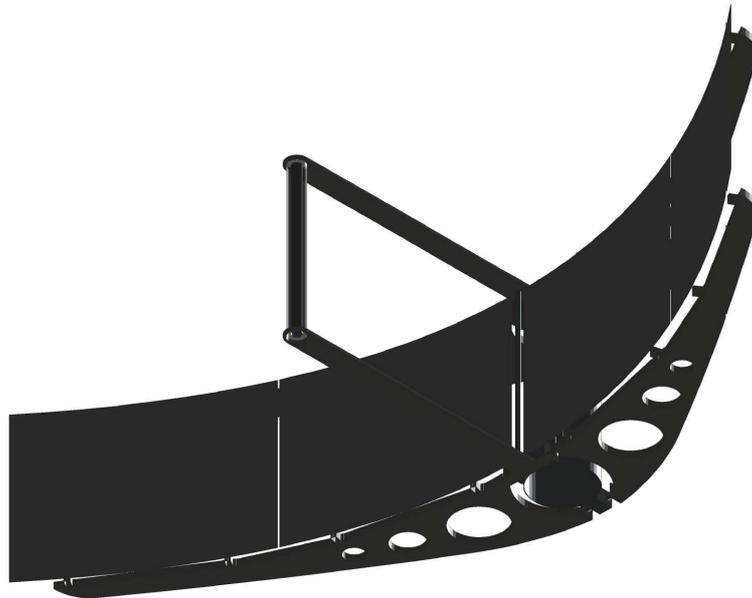
## 4.2 Descrizione della creazione del modello del collettore

Data la complessità e l'estensione della struttura del concentratore solare ( Figura 4.2) è stato necessario ricreare la struttura con l'ausilio del software AutoCAD, ottenendo così le varie parti della struttura (i pilastri, il supporto dello specchio, il collettore e rispettivamente i tubi di vetro e di acciaio).

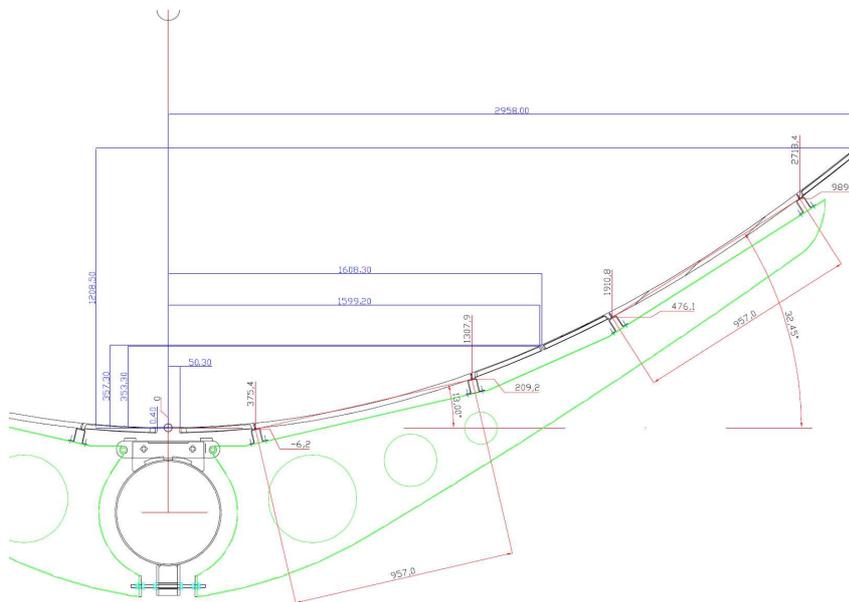


**Figura 4.2** - Panoramica centrale Archimede di Priolo Gargallo (SR)

Si è ritenuto sufficiente considerare solo una parte dell'intero impianto, in particolare la parte di collettore contenuta fra i due pilastri, poiché il radiometro può percorrere autonomamente solo quel percorso, dopodiché è necessario rimuoverlo manualmente e posizionarlo nello pezzo successivo del collettore. In Figura 4.3 è raffigurato il solido modellato e nella Figura 4.4 il profilo nel dettaglio di una parte dello specchio.



**Figura 4.3** – Modello eseguito con AutoCAD di una sezione del concentratore



**Figura 4.4** – Disegno tecnico del profilo dello specchio

Il modello realizzato è presente in “Allegato digitale B1 – Concentratore”.

Una volta realizzato il solido si è provveduto a importarlo in TracePro.

Per simulare i raggi provenienti dal sole si è creata una superficie avente le caratteristiche di un corpo nero che emette raggi normali alla superficie. A questo punto è stato possibile eseguire il *ray tracing*; questo consiste in una tecnica generale di ottica geometrica che si basa sul calcolo del percorso fatto dalla luce, seguendone i raggi attraverso l'interazione con le superfici.

Il risultato ottenuto può essere visualizzato con una mappatura sulla superficie interessata. La mappa d'irradianza permette di rappresentare l'interazione della superficie con i raggi, attraverso l'estrapolazione della posizione e dell'intensità dei raggi incidenti.

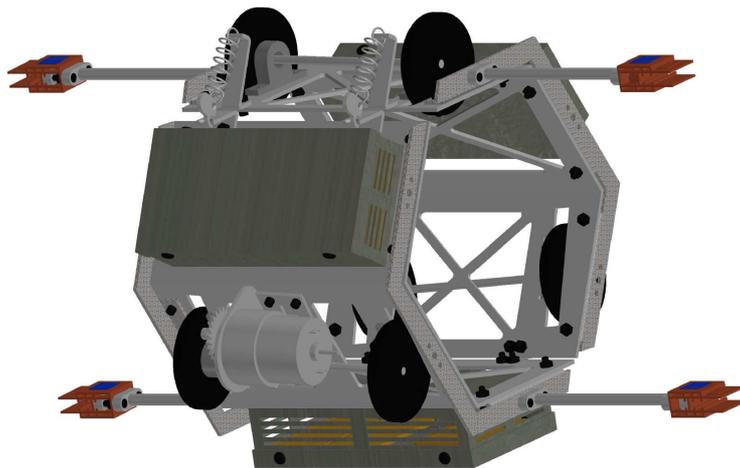
Il termine mappa d'irradianza si riferisce ad un metodo per calcolare efficientemente l'irradianza diffusa su una superficie per gli oggetti nella scena. Poiché non tutte le parti della scena hanno lo stesso dettaglio nella illuminazione indiretta, esso ha la funzione di calcolare l'illuminazione diffusa (GI) più accuratamente nelle parti importanti (es. dove si illumina una area piccola o dove gli oggetti sono vicini uno all'altro), e meno accuratamente nelle parti meno importanti (es. aree illuminate grandi ed uniformi). La mappa d'irradianza si crea quindi in maniera adattativa. Quest'ultima è, in conclusione, un insieme di punti nello spazio 3d (una nube di punti), dove ogni punto indica l'irradianza incidente.

A questo punto, attraverso svariate simulazioni, è possibile confrontare i dati ottenuti.

### **4.3 Descrizione della creazione del modello del radiometro**

Il solido del radiometro è stato precedentemente modellato dal Ing. Andrea Moretti, autore della tesi di laurea "Progetto di un prototipo di radiometro mobile per collettori solari termodinamici cilindrici".

Il modello trattato in questa tesi è stato leggermente modificato, convertendolo in un formato leggibile sul software AutoCAD e TracePro, rimuovendo inoltre una coppia di sensore e la relativa asta di sostegno, ottenendo un radiometro avente quattro coppie di sensori in totale, situati come visualizzato in Figura 4.5.



**Figura 4.5** –Modello Radiometro

Il modello sviluppato è presente in “Allegato digitale B2 – Radiometro”.

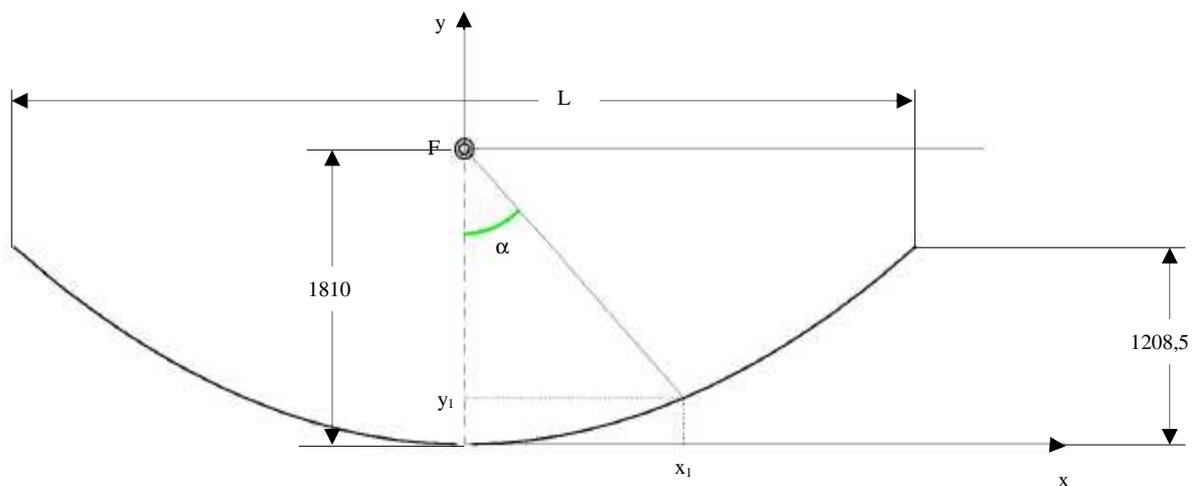
## Capitolo 5: Studio teorico della distribuzione del flusso sul ricevitore per un fascio incidente collimato perpendicolare in funzione dell'angolo d'incidenza sul fuoco

La parte riflettente del sistema di concentrazione è costituita da una serie di pannelli riflettenti che realizzano una superficie cilindroparabolica la cui sezione è una parabola di apertura nominale  $L=5900$  mm e fuoco posto a  $F=1810$  mm dal vertice.

Collochiamo l'intersezione fra gli assi  $x$  e  $y$  nel punto centrale dell'apertura della parabola ( $L/2$ ) ad una distanza  $F$  dal punto di fuoco.

La parabola ha equazione  $y = ax^2$  con  $a = 1/4F$  e la superficie riflettente la percorre fino ad un'ascissa curvilinea pari a  $3250$  mm.

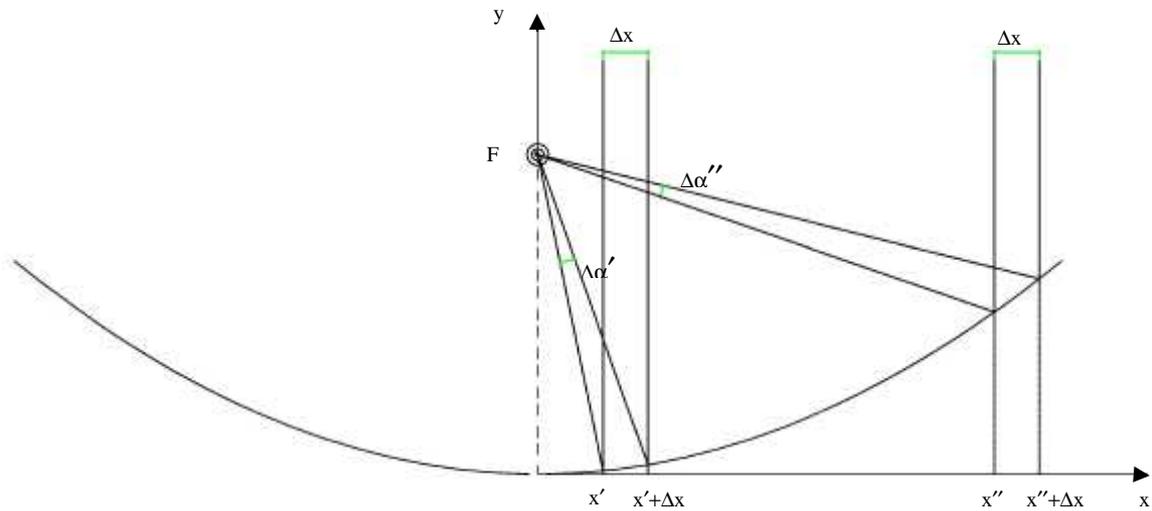
Consideriamo un qualsiasi punto sulla parabola  $(x_1, y_1)$  e tracciamo da quello un segmento che ha come secondo punto il fuoco della parabola. A questo punto si ottiene un angolo  $\alpha$  incluso tra il segmento e l'asse  $y$  (Figura 5.1).



**Figura 5.1** – Profilo geometrico della parabola

Si supponga che il punto  $(x_1, y_1)$  considerato sia il luogo d'incidenza di un raggio parallelo all'asse della parabola e che questo venga riflesso dalla superficie riflettente verso il punto di fuoco della parabola con un angolo d'incidenza  $\alpha$  sulla superficie del tubo ricevente. Allora l'irradianza sul tubo ricevitore  $E(\alpha)$ , in funzione dell'angolo  $\alpha$ , è proporzionale a  $\frac{dx}{d\alpha}$ .

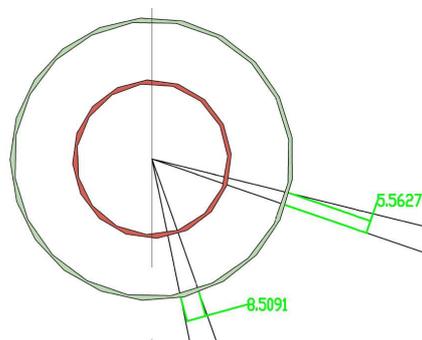
Per meglio spiegare questo concetto osserviamo la Figura 5.2 ed immaginiamo di illuminare lo specchio con due fasci paralleli della stessa estensione trasversale  $\Delta x$  incidente su due punti diversi dello specchio,  $x'$  e  $x''$ , e di misurare le estensioni angolari  $\Delta\alpha'$  e  $\Delta\alpha''$  corrispondenti ai raggi riflessi.



**Figura 5.2** – Profilo geometrico della parabola

È chiaro che a segmenti  $\Delta x$  uguali corrispondono flussi incidenti sullo specchio e sul ricevitore uguali a parità di lunghezza del tratto parallelo all'asse del ricevitore insieme al tratto  $\Delta x$  definisce l'area d'incidenza. Quindi l'irradianza sulla superficie del tubo ricevitore sarà tanto maggiore quanto minore saranno le proiezioni in direzione del fuoco degli archi intercettati dal flusso sul tubo e quindi gli angoli  $\Delta\alpha$  corrispondenti.

Osservando la Figura 5.3 si vede chiaramente che se si aumenta la  $x$ , l'angolo  $\Delta\alpha$  diminuisce.



**Figura 5.3** – Particolare della figura 5.2 in prossimità del ricevitore

Essendo  $E(\alpha)$  proporzionale alla derivata di  $x$  rispetto ad  $\alpha$ , è necessario trovare la relazione tra i due valori, ovvero come varia  $x$  in funzione dell'angolo  $\alpha$ .

La caratteristica di ogni parabola è che la distanza di un generico punto P dal fuoco è uguale a quella dello stesso punto dalla retta direttrice. Da qui ne segue facilmente che l'equazione della parabola, quando la sua concavità è diretta verso l'alto e il vertice è posto all'origine degli assi, diventa:

$$y = \frac{x^2}{4F} \quad \text{Equazione 5.1}$$

Ora esprimiamo y in funzione di x ed  $\alpha$ .

$$y = F - \frac{x}{\operatorname{tg} \alpha} \quad \text{Equazione 5.2}$$

Sapendo che l'equazione generale della parabola è  $y = ax^2$  con  $a = 1/4F$ , si ottiene:

$$y = \frac{x^2}{4F} \quad \text{Equazione 5.3}$$

Eguagliando le y:

$$F - \frac{x}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{x^2}{4F} \quad \text{Equazione 5.4}$$

$$\Rightarrow \frac{x^2}{4F} + \frac{x}{\operatorname{tg} \alpha} - F = 0 \quad \text{Equazione 5.5}$$

Essendo un'equazione di secondo grado sono presenti due soluzioni:

$$x_{1/2} = \frac{-\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \pm \sqrt{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + 1}}{\frac{1}{2F}} = \frac{-\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \pm \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}{\frac{1}{2F}} \quad \text{Equazione 5.6}$$

Dato che il valore interessato deve essere positivo, considero solo la soluzione positiva:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{-\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}{\frac{1}{2F}} = \frac{2F}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) \\ &= \frac{2F}{\operatorname{sen} \alpha} \cdot (1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad \text{Equazione 5.7}$$

A questo punto è necessario derivare la posizione  $x_1$  in funzione dell'angolo d'incidenza sul tubo ricevitore  $\alpha$ .

$$\begin{aligned}
\frac{dx}{d\alpha} &= \left[ 2F \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot \left( -\frac{\cos \alpha}{\text{sen}^2 \alpha} \right) \right] + \frac{2F}{\text{sen} \alpha} \cdot (\text{sen} \alpha) \\
&= 2F \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{\cos \alpha}{\text{sen}^2 \alpha} \cdot (1 - \cos \alpha) \right] \right\} = 2F \cdot \left( 1 - \frac{\cos \alpha}{\text{sen}^2 \alpha} + \frac{\cos^2 \alpha}{\text{sen}^2 \alpha} \right) \\
&= 2F \cdot \left( \frac{\text{sen}^2 \alpha - \cos \alpha + \cos^2 \alpha}{\text{sen}^2 \alpha} \right) \\
&= \frac{2F}{\text{sen}^2 \alpha} \cdot (1 - \cos \alpha)
\end{aligned}$$

**Equazione 5.8**

Allora:  $E(\alpha) \propto \frac{2F}{\text{sen}^2 \alpha} \cdot (1 - \cos \alpha)$

Ipotizziamo che la Parabola riflettente prolunghi le sue estremità fino a raggiungere la stessa altezza del fuoco. In questo modo è possibile considerare che l'angolo d'incidenza  $\alpha$  sulla superficie del tubo ricevitore sia incluso in un intervallo che abbia come valore minimo  $-90^\circ$  e massimo  $+90^\circ$ .

Calcoliamo  $\left. \frac{dx}{d\alpha} \right|_{\alpha=0^\circ}$  :

$$\left. \frac{dx}{d\alpha} \right|_{\alpha=0^\circ} = \left. \frac{2F}{\text{sen}^2 \alpha} \cdot (1 - \cos \alpha) \right|_{\alpha=0^\circ} = \frac{0}{0} =$$

**Equazione 5.9**

$$\left. \frac{dx}{d\alpha} \right|_{\alpha=0^\circ} = \left. \frac{\frac{d}{d\alpha} 2F \cdot (1 - \cos \alpha)}{\frac{d}{d\alpha} \text{sen}^2 \alpha} \right|_{\alpha=0^\circ} = \left. \frac{2F \cdot \text{sen} \alpha}{2 \text{sen} \alpha \cos \alpha} \right|_{\alpha=0^\circ} = \frac{0}{0}$$

**Equazione 5.10**

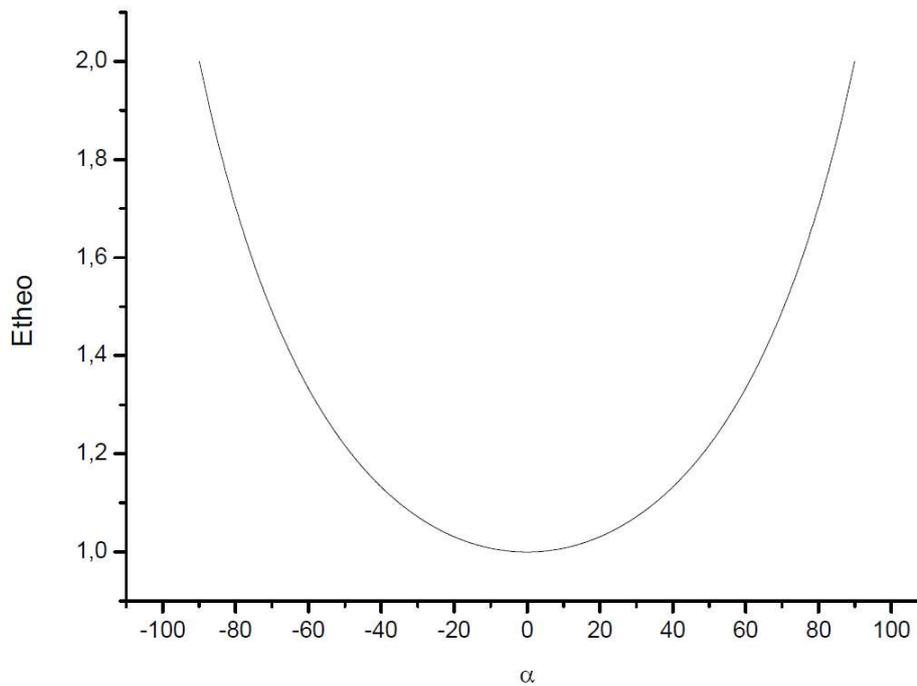
$$\left. \frac{dx}{d\alpha} \right|_{\alpha=0^\circ} = \left. \frac{\frac{d}{d\alpha} 2F \cdot \text{sen} \alpha}{\frac{d}{d\alpha} 2 \text{sen} \alpha \cos \alpha} \right|_{\alpha=0^\circ} = \left. \frac{2F \cdot \cos \alpha}{2 \cos^2 \alpha - 2 \text{sen}^2 \alpha} \right|_{\alpha=0^\circ} = \frac{2F}{2} = F$$

**Equazione 5.11**

Essendo che, per  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\frac{dx}{d\alpha} = 2F$ , troviamo così che la derivata  $\frac{dx}{d\alpha}$  raddoppia il suo valore passando da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Di conseguenza anche  $E(\alpha)$  raddoppia passando da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

Se normalizziamo  $E(\alpha)$  al valore  $E(0^\circ) = 1$  avremo allora che  $E(\alpha)$  varierà da 1 a 2 per  $\alpha$  che varia da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

Questo è illustrato nel grafico 5.1.



**Grafico 5.1** – andamento di  $E(\alpha)$  normalizzato

Dal Grafico 5.1 si deduce che con l'aumentare dell'angolo d'incidenza  $\alpha$  cresce l'irraggiamento sul tubo. Allora si evince che si avrà un maggiore irraggiamento nelle zone laterali del tubo ricevitore. Il confronto fra gli andamenti, reale e teorico, verrà affrontato nel Capitolo 6.1.

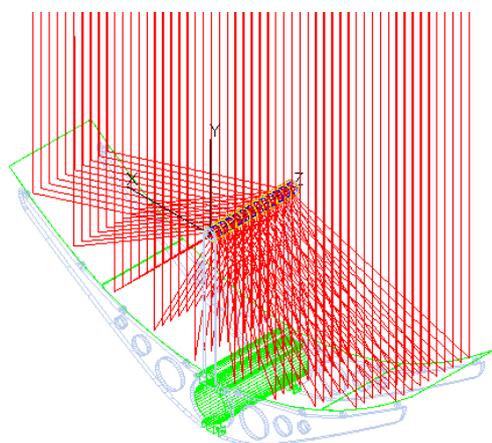
## Capitolo 6: Modellazione ottica del collettore in assenza del radiometro

In questo capitolo studiamo il comportamento del concentratore in condizioni di cielo sereno e con il piano d'incidenza della luce sempre coincidente con il piano di simmetria del concentratore.

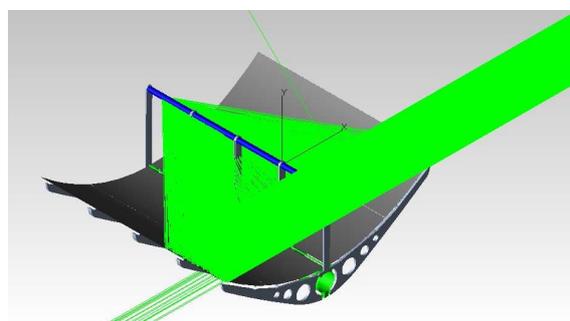
Analizziamo poi solo due particolari situazioni: quella con i raggi solari perpendicolari all'asse del ricevitore (angolo d'incidenza uguale a  $0^\circ$ ) e quella con i raggi solari inclinati rispetto ad esso (angolo d'incidenza uguale a  $45^\circ$ ).

L'impianto ha, come precedentemente affermato, la possibilità di inseguire il sole attraverso la rotazione di tutto il concentratore rispetto ad un asse fisso (il componente verde in Figura 6.1); in tal modo il piano d'incidenza della luce sarà sempre coincidente con quello di simmetria del concentratore, però l'angolo d'incidenza varierà in funzione dell'ora e del giorno dell'anno.

I due casi da noi studiati saranno esemplificativi del comportamento del concentratore (vedi Figura 6.1 – 6.2) nelle più svariate condizioni operative.

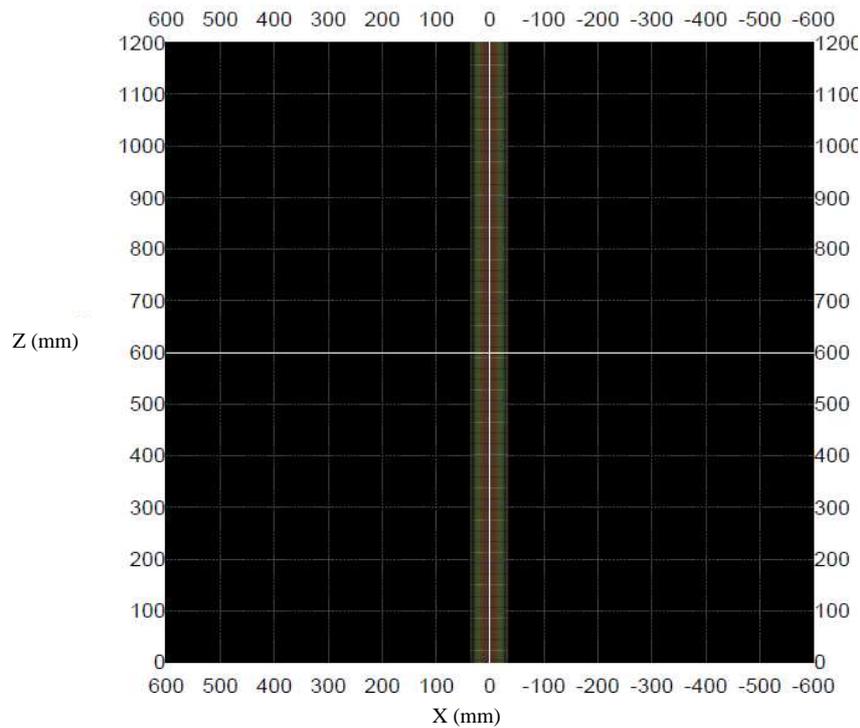


**Figura 6.1** – Incidenza dei raggi con angolo d'incidenza di  $0^\circ$



**Figura 6.2** – Incidenza dei raggi con angolo d'incidenza di  $45^\circ$

Le prime simulazioni con TracePro del concentratore erano state fatte considerando un ricevitore con lunghezza pari a 1200 mm, corrispondenti alla lunghezza di una unità di specchi e ai 3/10 del percorso libero massimo che avrebbe potuto fare il radiometro mobile (lunghezza di un unità di tubo, 4060 mm). Operando in questo modo, però si ottiene una distribuzione del flusso con una bassa risoluzione lungo la direzione perpendicolare all'asse del tubo (vedi Figura 6.3).



**Figura 6.3** – Mappa d’irradianza del tubo ricevitore di lunghezza 1200 mm e larghezza 70 mm

Questo problema è stato risolto suddividendo il tubo in tante unità (12) uguali tra loro, della lunghezza di 100 mm ciascuna. In tal modo si è potuto raggiungere una risoluzione molto alta: la mappa d’irradianza è suddivisa in celle di 0.07x0.07 mm lungo le due direzioni ortogonali (vedi Figura 6.4). I raggi del fascio incidente sono mandati uniformemente sulla parabola nell’area di dimensioni 5900x100 mm<sup>2</sup>.

La mappa d’irradianza che verrà proiettata riguarda la sezione semicircolare inferiore del tubo ricevitore (vedi Figura 6.4).



**Figura 6.4** - Sezione semicircolare inferiore del tubo ricevitore

## 6.1 Confronto fra andamento della distribuzione del flusso teorico e simulato sul ricevitore

In questo capitolo si confronta l'andamento teorico realizzato nel Capitolo 5 con un andamento ottenuto tramite la modellazione ottica del concentratore solare.

Si consideri lo specchio concentratore, il tubo di vetro ed il tubo ricevitore aventi, rispettivamente, le caratteristiche di specchio perfetto ( $R=1$ ), trasmettitore perfetto ( $T=1$ ) ed assorbitore perfetto ( $A=1$ ). Inoltre, in questo caso, per comodità, non si considerino le fenditure fra gli specchi e si consideri dunque una superficie specchiante continua. I raggi sono stati mandati con un angolo d'incidenza di  $0^\circ$  e sono pari a 25 milioni.

La lunghezza del tubo considerata corrisponde a 70 mm; in tal modo è possibile escludere le parti in cui non vi sono raggi incidenti ed avere una mappatura completa del tubo ricevitore.

Operando come enunciato nel capitolo precedente, si esegue il ray tracing e si ricava la mappa d'irradianza sulla superficie del tubo ricevitore, proiettato su un piano ortogonale alla direzione dei raggi (vedi Figura 6.5).

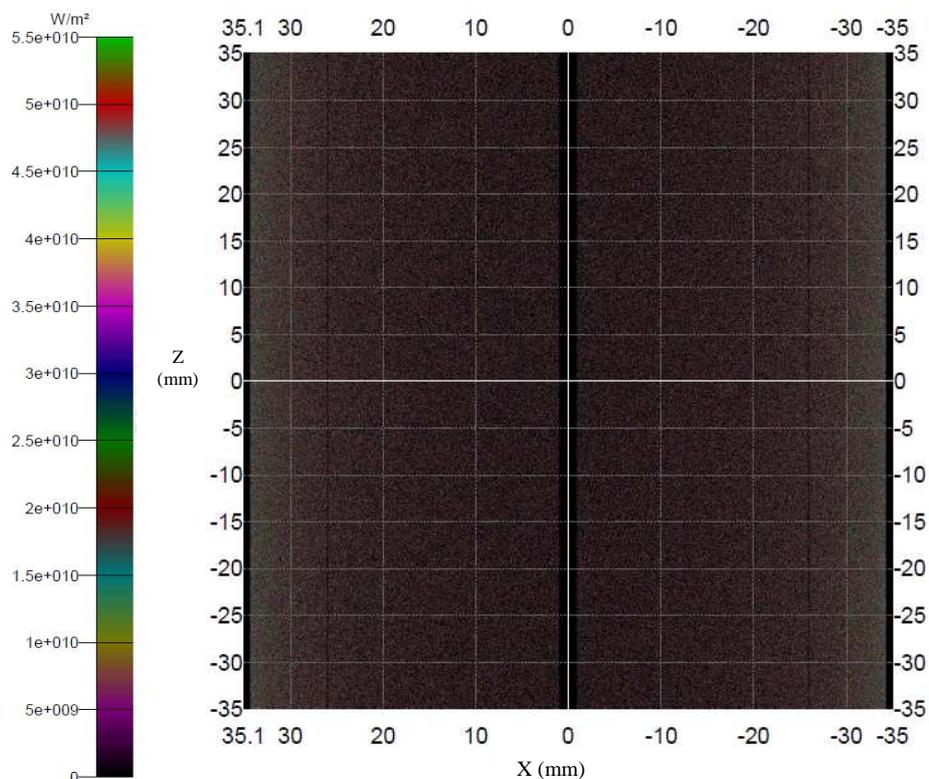
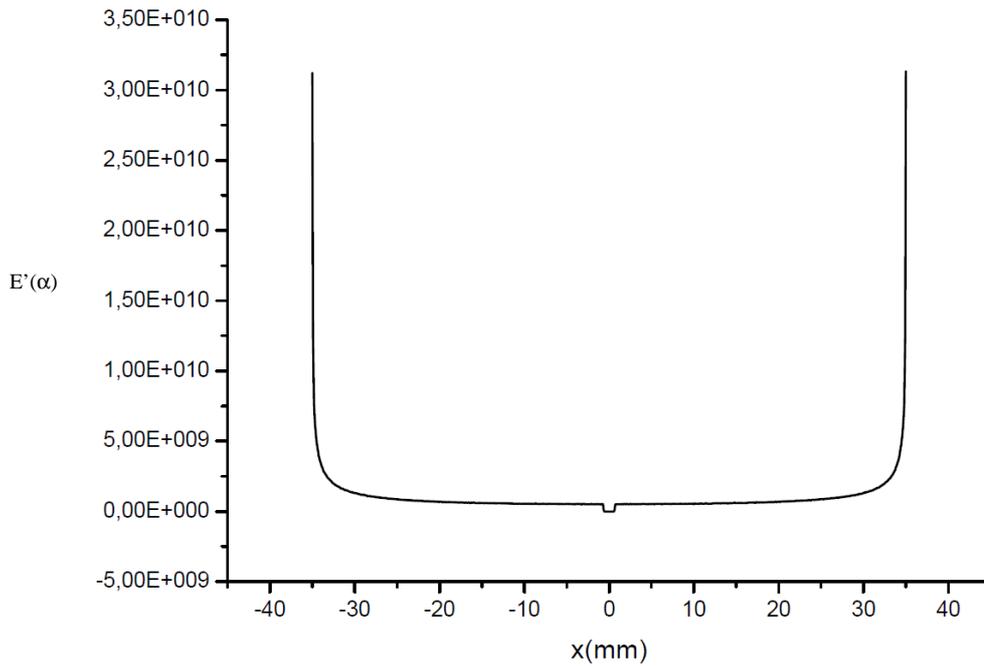


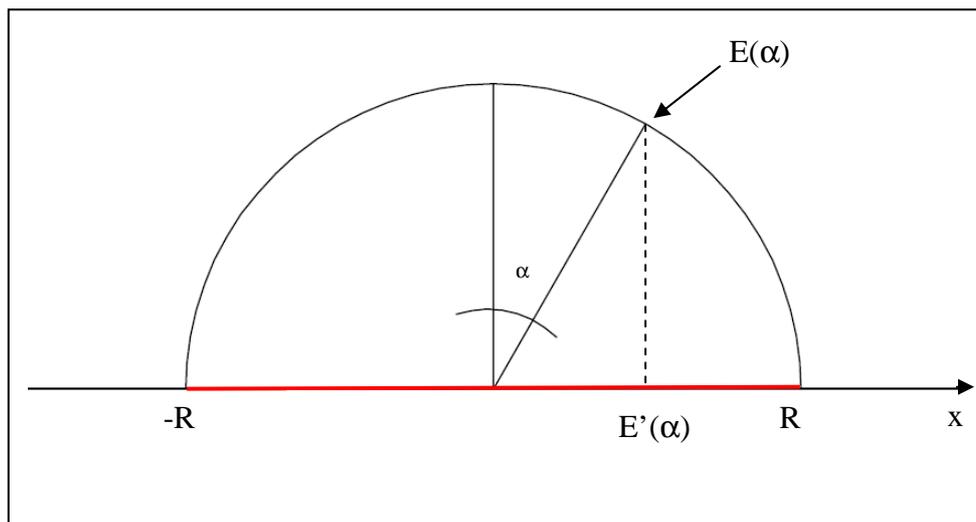
Figura 6.5 – Mappa d'irradianza di una sezione del tubo ricevitore di lunghezza 100 mm

Operando la media dei valori ottenuti rispetto a z (asse del tubo) si ottiene il Grafico 6.1:



**Grafico 6.1** – Proiezione del valore medio dell'irradianza dei raggi incidenti sul tubo ricevitore

La mappa d'irradianza (vedi Figura 6.5) mostra l'irradianza sulla superficie semicircolare del tubo ricevitore proiettata sul piano x-z. Per comprendere meglio ciò si osservi la Figura 6.6, dove è illustrata la sezione su cui viene focalizzato il fascio. L'irradianza effettiva sul tubo,  $E(\alpha)$ , viene proiettata dal programma sul piano x-z. L'effetto di questa proiezione è che l'irradianza viene esaltata di un fattore  $1/\cos\alpha$ .



**Figura 6.6** – Schematizzazione della proiezione sul piano x-z dell'irradianza sul tubo ricevitore

$E'(\alpha)$  indica la proiezione dell'irradianza reale ( $E(\alpha)$ ) generata dall'incidenza dei raggi riflessi dallo specchio sul piano x-z. R è il raggio del tubo.

Una caratteristica che risalta dal Grafico 6.1 è l'aumento in maniera esponenziale dell'irradianza nei punti prossimi ai bordi del tubo, prodotto dal fatto che laddove l'angolo  $\alpha \approx 90^\circ$  il fattore  $1/\cos\alpha$  tende all'infinito. Nella simulazione i valori estremi del profilo raggiungono valori finiti anche se alti, dovuto alla risoluzione limitata disponibile.

L'ubicazione di  $x(\alpha)$  rispetto al piano x-z è funzione dell'angolo  $\alpha$  ed è regolata dall'Equazione 6.1:

$$x(\alpha) = R \sin \alpha \quad \text{Equazione 6.1}$$

Quindi:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{x}{R}\right) \quad \text{Equazione 6.2}$$

L'irradianza dei raggi incidenti  $E(\alpha)$  corrisponde alla proiezione dell'irradianza sul piano x-z in funzione dell'angolo  $\alpha$  secondo l'Equazione 6.3:

$$E(\alpha) = E'(\alpha) \cos \alpha \quad \text{Equazione 6.3}$$

Allora:

$$E(\alpha) = E'(\alpha) \cos \left[ \sin^{-1}\left(\frac{x}{R}\right) \right] \quad \text{Equazione 6.4}$$

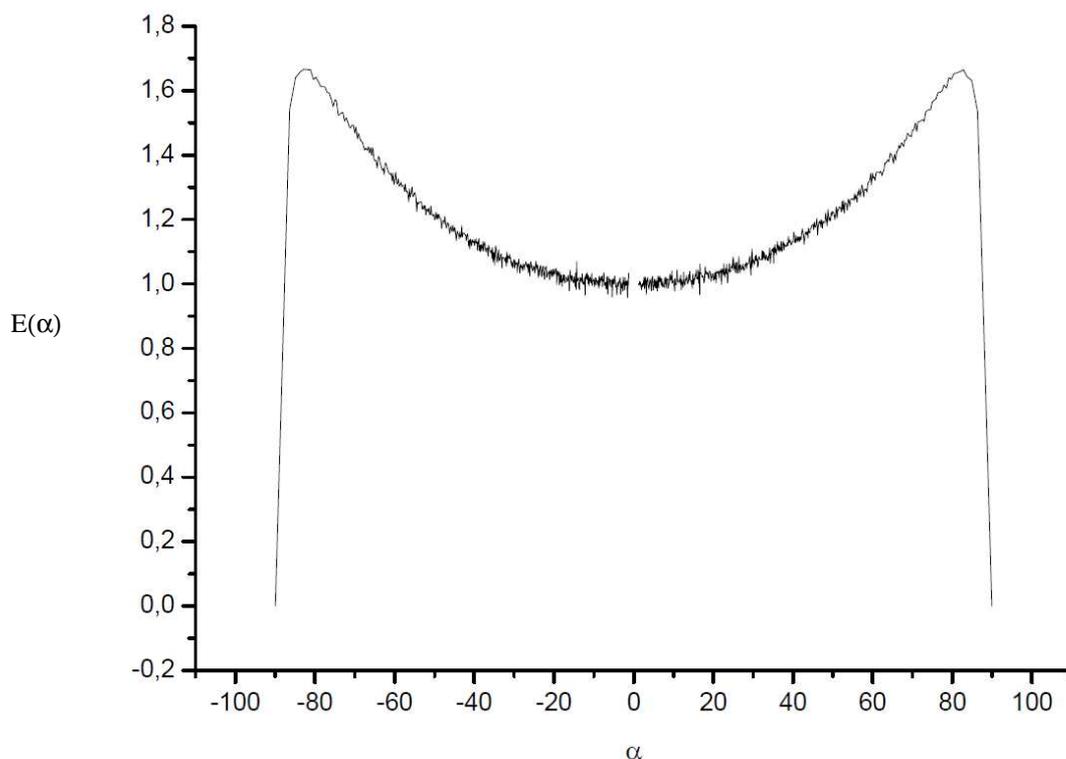
Essendo i valori di  $E'(\alpha)$  del Grafico 6.1 estremamente elevati, per comodità dividiamo per  $10^9$ , in tal modo il trattamento risulta più semplice. Successivamente abbiamo normalizzato i dati così ottenuti dividendoli per il valore medio ottenuto prendendo una trentina di valori prossimi alla parte corrispondente al centro del tubo, nella parte con i valori più bassi del diagramma.

Il valore medio è stato preso perché nel diagramma sono presenti delle lievi oscillazioni. Queste sono causate dalla variazione d'intensità sui vari punti del ricevitore, dovute al numero limitato di

raggi. Infatti più raggi si mandano e meno è evidente il fenomeno di rumore presente nel diagramma.

Inoltre sono stati eliminati i valori relativi alla zona in cui vi è assenza di raggi per effetto delle zone oscure dello specchio (fenditure).

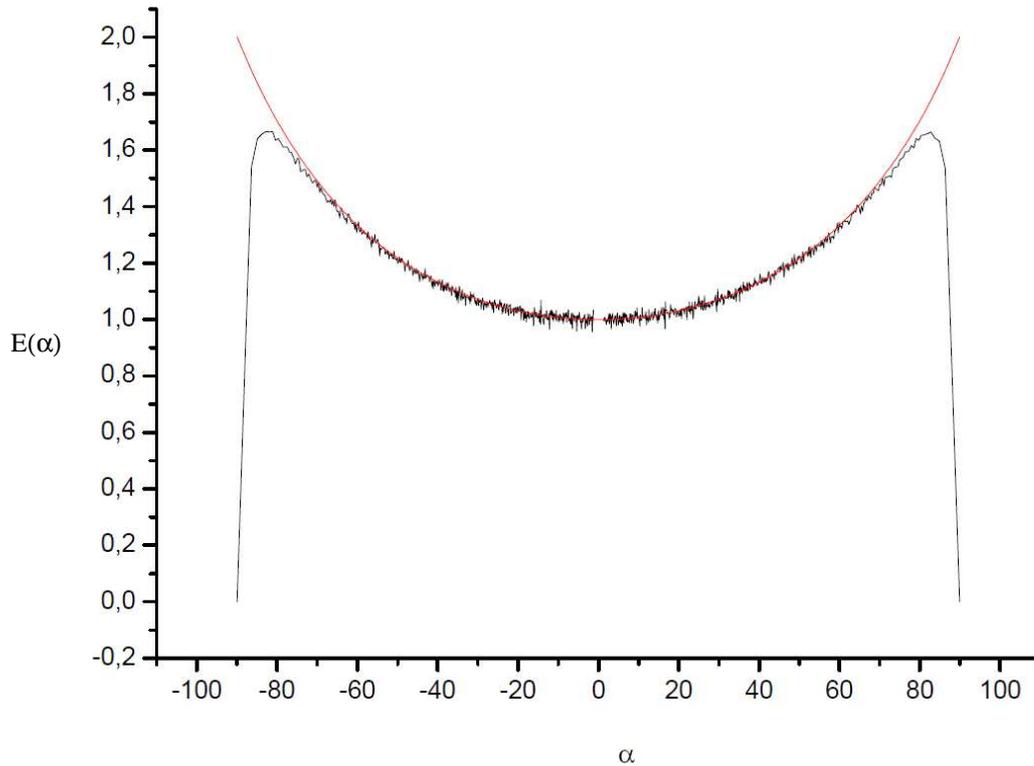
Applicando l'Equazione 6.4 sul valore medio normalizzato ottenuto e rappresentato dal Grafico 6.1, si ottiene il Grafico 6.2, nel quale si è sostituito il valore della posizione indicata con  $x$  in ascissa con il valore dell'angolo incidente  $\alpha$  in funzione della posizione, come calcolato con l'Equazione 6.2.



**Grafico 6.2** – Valore medio normalizzato dell'irradianza effettiva dei raggi incidenti sul tubo ricevitore

A questo punto è essenziale mettere a confronto la distribuzione di  $E(\alpha)$  calcolata con quella teorica quantificata nel Capitolo 5 (vedi Figura 5.1).

Comparando dunque i Grafici 5.1 e 6.2, si ottiene il Grafico 6.3.



**Grafico 6.3** –Confronto fra Grafico 5.1 e 6.2

Osservando i due grafici, è evidente che l'andamento teorico e quello reale sono gli stessi, comprovando che si avrà un maggiore irraggiamento nella zone laterali del tubo ricevitore e quindi l'irradianza maggiore.

Nelle parti laterali per  $\alpha$  circa  $90^\circ$ , si nota che l'andamento teorico non coincide perfettamente con quello simulato. Questa differenza è data dall'errore numerico causato dal processo di proiezione dell'irradianza sul piano e della successiva correzione con il fattore  $\cos\alpha$ .

Gli allegati con il foglio di calcolo Origin per tutte le curve presentate ( Grafici 6.1-6.3 ) sono contenuti nell'allegato: “Allegato digitale D – Confronto tra modello teorico e reale”

## **6.2 Modellazione ottica con angolo d'incidenza di $0^\circ$**

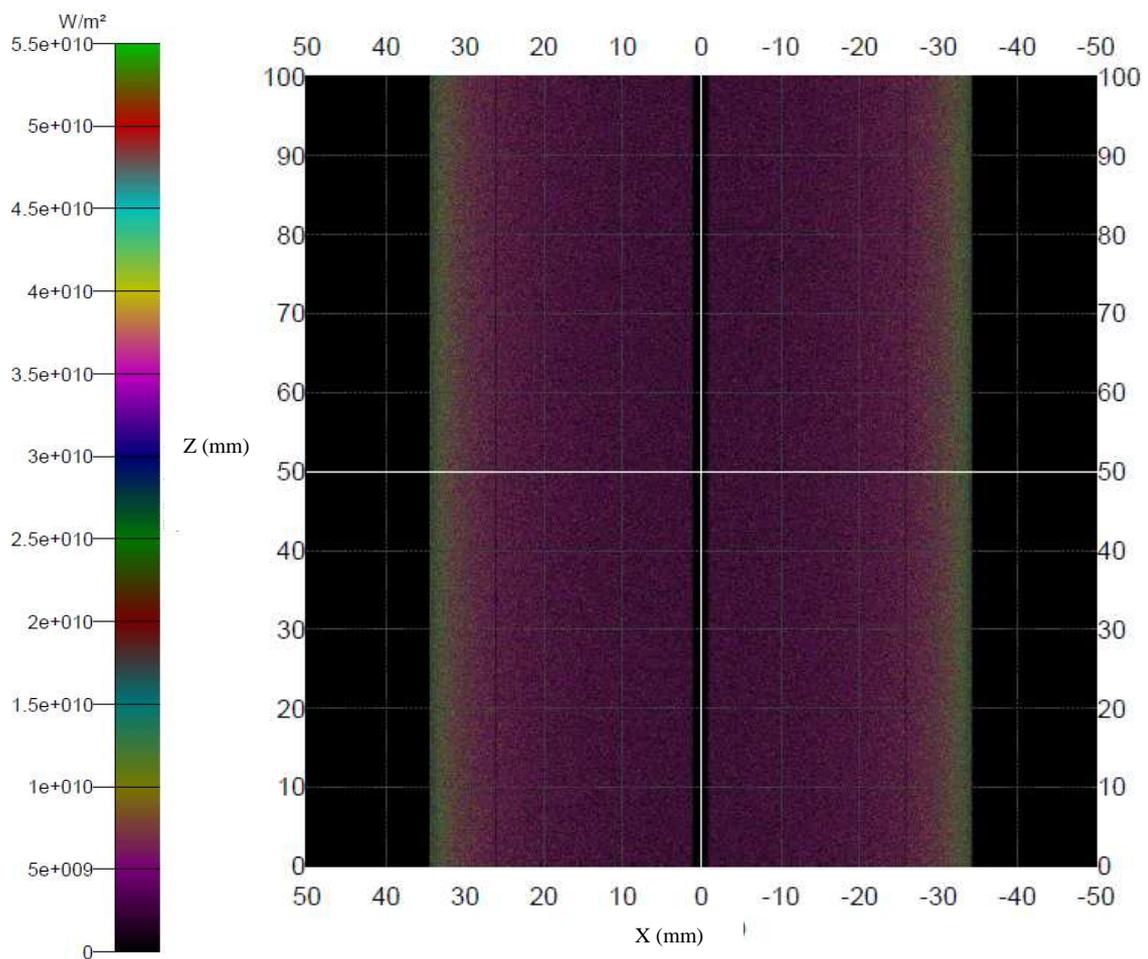
Nel caso studiato di seguito si suppone che l'inclinazione dei raggi del sole corrisponda a  $0^\circ$ .

Il ray tracing eseguito in quest'ipotesi considera un numero di raggi pari a 3 milioni che colpiscono lo specchio e vengono riflessi da una superficie del ricevitore lunga 100 mm. Si è preferito considerare una parte di superficie di 100 mm per aver un maggior numero di dati per unità di area

da analizzare, considerando che il comportamento è il medesimo sulla restante superficie, aumentando così l'accuratezza del calcolo.

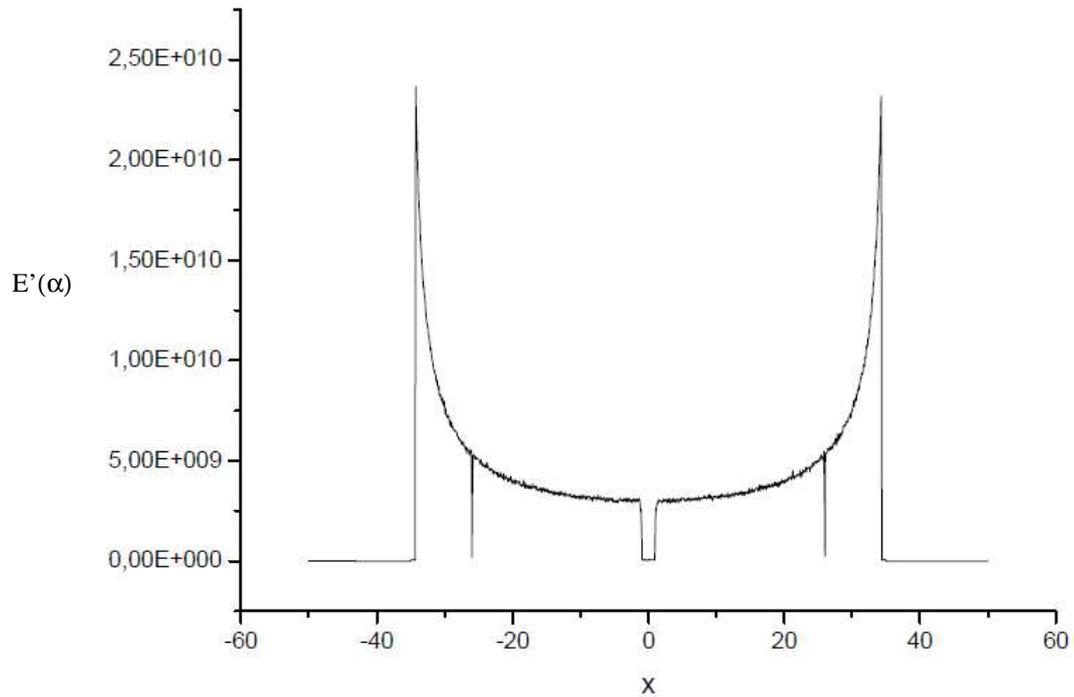
Lo studio ottico che segue corrisponde alla simulazione del comportamento reale del collettore, ovvero considereremo lo specchio concentratore, il tubo di vetro ed il tubo ricevitore con le caratteristiche reali riportate nel paragrafo 2.4.

Un volta eseguito il ray tracing, è possibile estrapolare i dati ottenuti attraverso la mappa d'irradianza della superficie che si vuole analizzare. La mappa d'irradianza del tubo d'acciaio si presenta come in Figura 6.7.



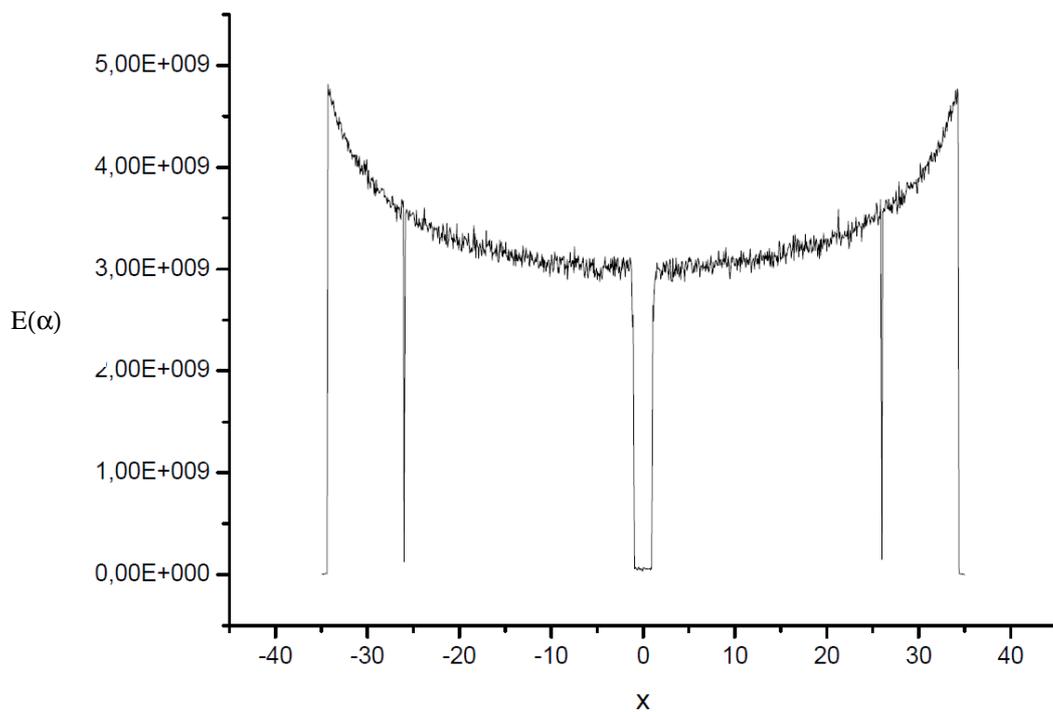
**Figura 6.7** – Mappa d'irradianza della superficie del tubo ricevitore in presenza del tubo di vetro

Operando la media dei valori ottenuti rispetto a z, si ottiene il Grafico 6.4:



**Grafico 6.4** – Proiezione del valore medio dell'irradianza dei raggi incidenti del tubo ricevitore

Eseguendo l'Equazione 6.4 sul valore medio ottenuto e rappresentato dal Grafico 6.4 si ottiene il Grafico 6.5.



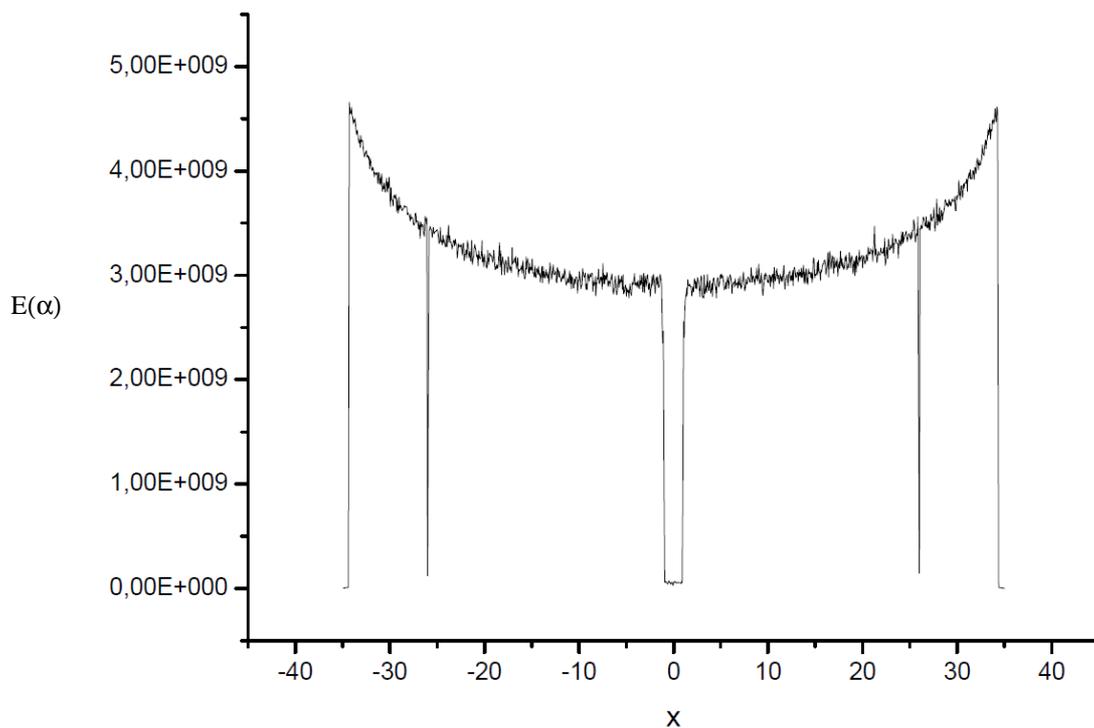
**Grafico 6.5** – Valore medio dell'irradianza effettiva dei raggi incidenti sul tubo ricevitore

I dati elaborati sono stati ottenuti dai raggi incidenti sul tubo ricevitore.

Nonostante le proprietà dei materiali e del coating depositato sulle superfici al fine di ottenere il comportamento più vicino a quello ideale, parte dei raggi incidenti sulla superficie viene disperso. Per esempio per il tubo ricevitore, la cui funzione è quella di assorbire il maggior numero di raggi, si cerca di evitare la riflessione di essi. Eseguendo una nuova mappatura della superficie e considerando solamente la parte assorbita è possibile mettere in evidenza la differenza presente fra la radiazione incidente e quella assorbita.

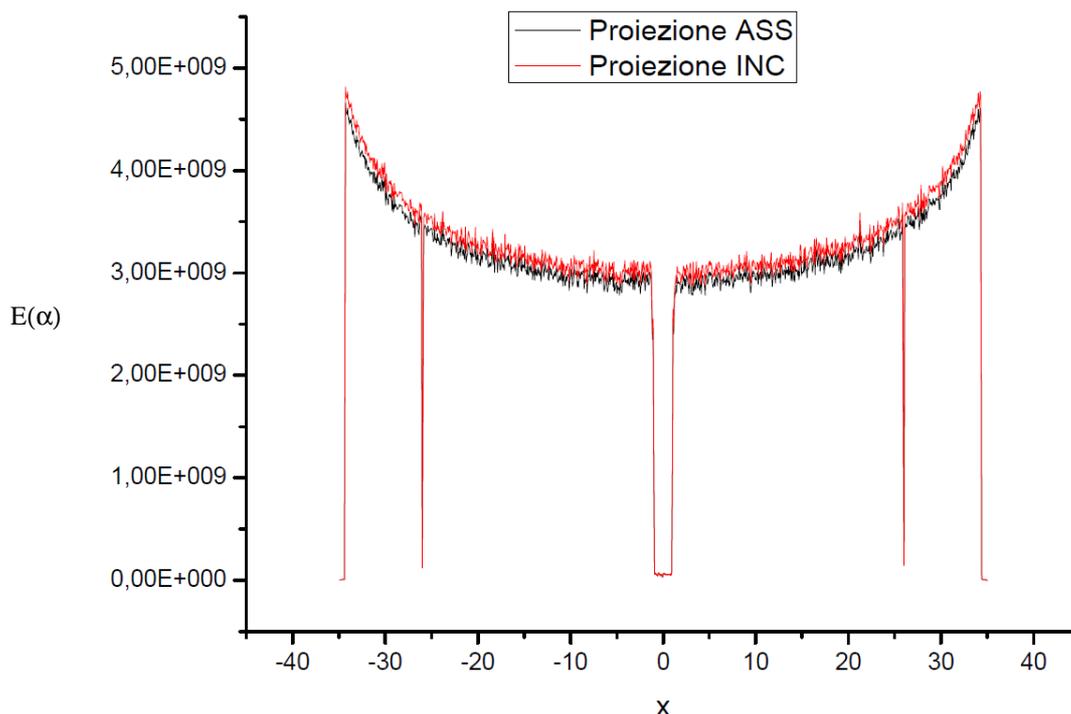
Seguendo lo stesso ragionamento effettuato in precedenza per eseguire la mappatura della superficie ricevente, possiamo estrapolare, dall'elaborazione della modellazione ottica eseguita con TracePro, la mappa dell'irradianza dei raggi assorbiti.

Il Grafico 6.6 raffigura il valore medio dell'irradianza dei raggi assorbiti dal tubo ricevitore con i valori corretti dal processo di proiezione.



**Grafico 6.6** – Valore medio dell'irradianza dei raggi assorbiti del tubo ricevitore

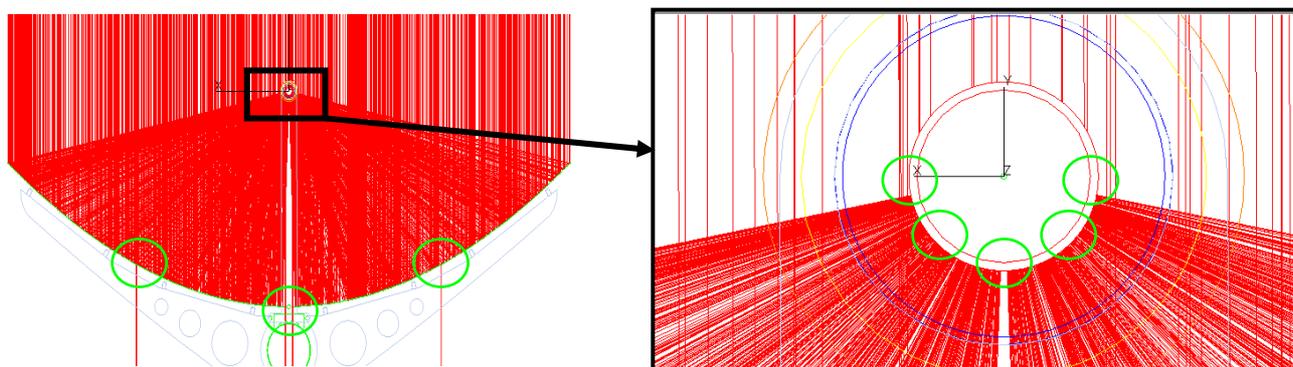
Comparando i grafici dei raggi incidenti ed assorbiti, otteniamo il Grafico 6.7.



**Grafico 6.7** –Confronto fra Grafico 6.5 e 6.6

Dal confronto si evince che l’irradianza assorbita è minore di quella incidente, come aspettato.

Esaminando i diagrammi si nota che ci sono dei punti in cui l’irradianza è uguale a 0; questi punti corrispondono ai punti in cui i raggi non colpiscono la superficie: gli andamenti tendenti a 0 più esterni sono gli estremi del tubo; quelli centrali invece sono un effetto della fenditura posta tra gli specchi. Per comprendere meglio questo risultato, si osservi la Figura 6.8, nella quale le parti dove non viene riflessa la luce sono evidenziate in verde.



**Figura 6.8** – Vista laterale del collettore con particolare del tubo ricevitore

Gli allegati con il foglio di calcolo Origin per tutte le curve presentate ( Grafici 6.4 - 6.7 ) sono contenuti nell’allegato: “Allegato digitale C – Mappa d’irradianza tubo ricevitore reale con fascio incidente a 0°”.

### 6.3 Modellazione ottica con angolo d'incidenza di 45°

Nel caso studiato di seguito si suppone che l'inclinazione dei raggi del sole corrisponda a 45°.

Il ray tracing eseguito in quest'ipotesi considera un numero di raggi pari a 3 milioni che colpiscono lo specchio e vengono riflessi da questo, come illustrato in Figura 6.9, sulla superficie del ricevitore lunga 2000 mm. Il tubo ricevitore è stato diviso in 20 parti, ognuna di lunghezza pari a 100 mm per aver un maggior numero di dati per unità di area da analizzare poiché i raggi riflessi si diffondono su tutta la superficie. Consideriamo la somma di ogni sezione del tubo, tenendo conto del comportamento per ogni superficie di esse, aumentando così l'accuratezza del calcolo.

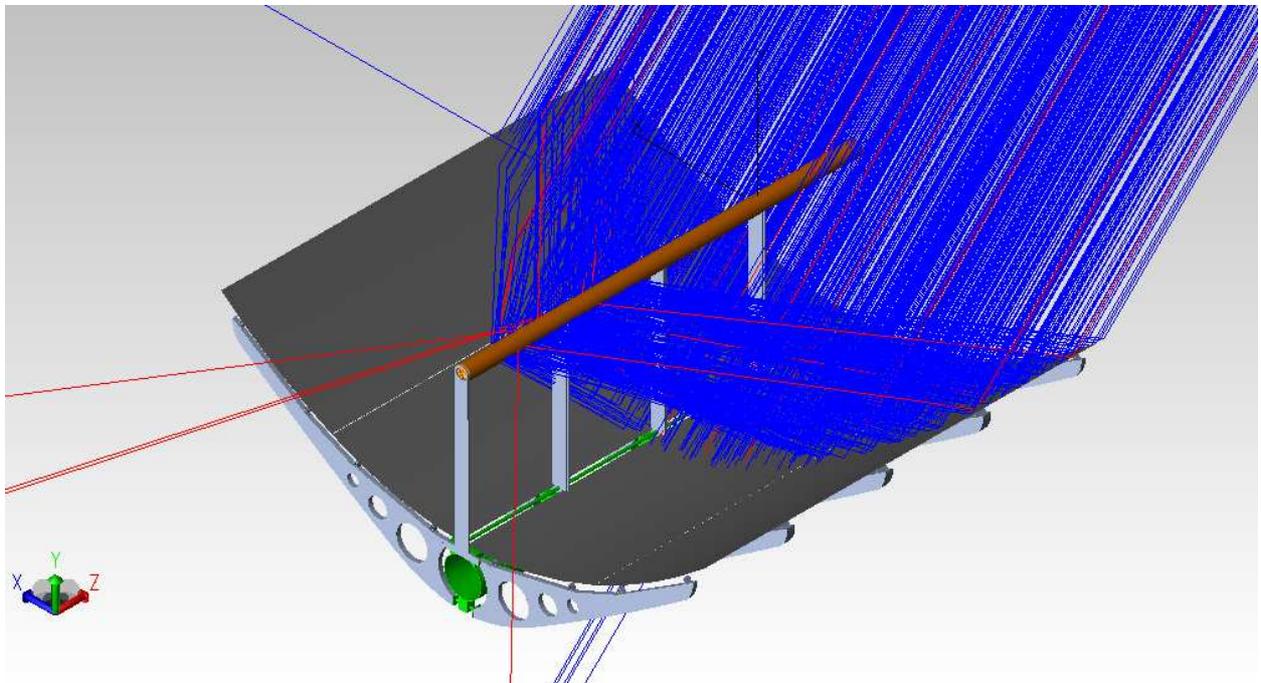
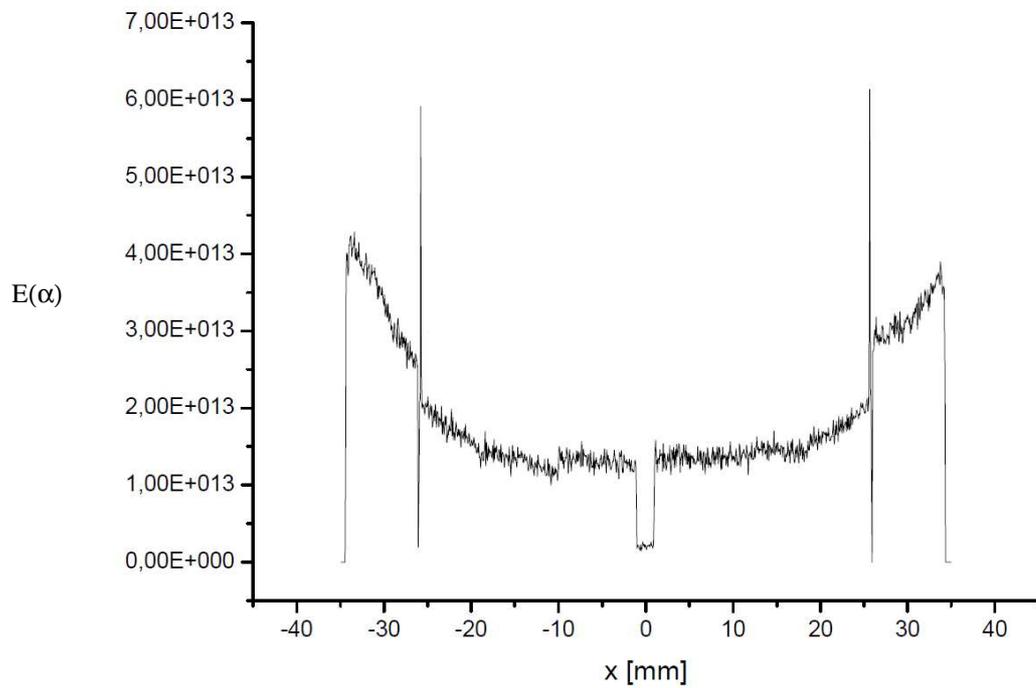


Figura 6.9 – Ray Tracing con angolo d'incidenza di 45°

Lo studio ottico che segue corrisponde alla simulazione del comportamento reale del collettore, ovvero considereremo lo specchio concentratore, il tubo di vetro ed il tubo ricevitore con le caratteristiche reali riportate nel paragrafo 2.4.

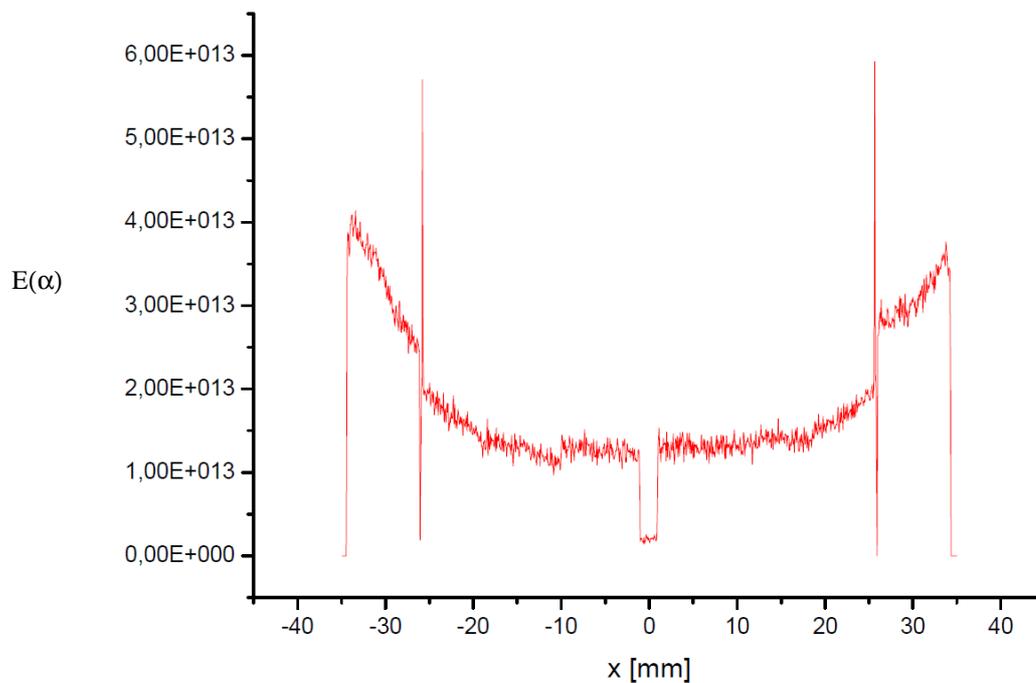
Un volta eseguito il ray tracing, è possibile estrapolare i dati ottenuti attraverso la somma delle varie mappa d'irradianza delle superfici che si vogliono analizzare, elaborando i dati ottenuti raggi incidenti sul tubo ricevitore.

Operando la media dei valori ottenuti rispetto a z ed applicando l'Equazione 6.4 sul valore medio ottenuto e rappresentato dal Grafico 6.7 si ottiene il Grafico 6.8.



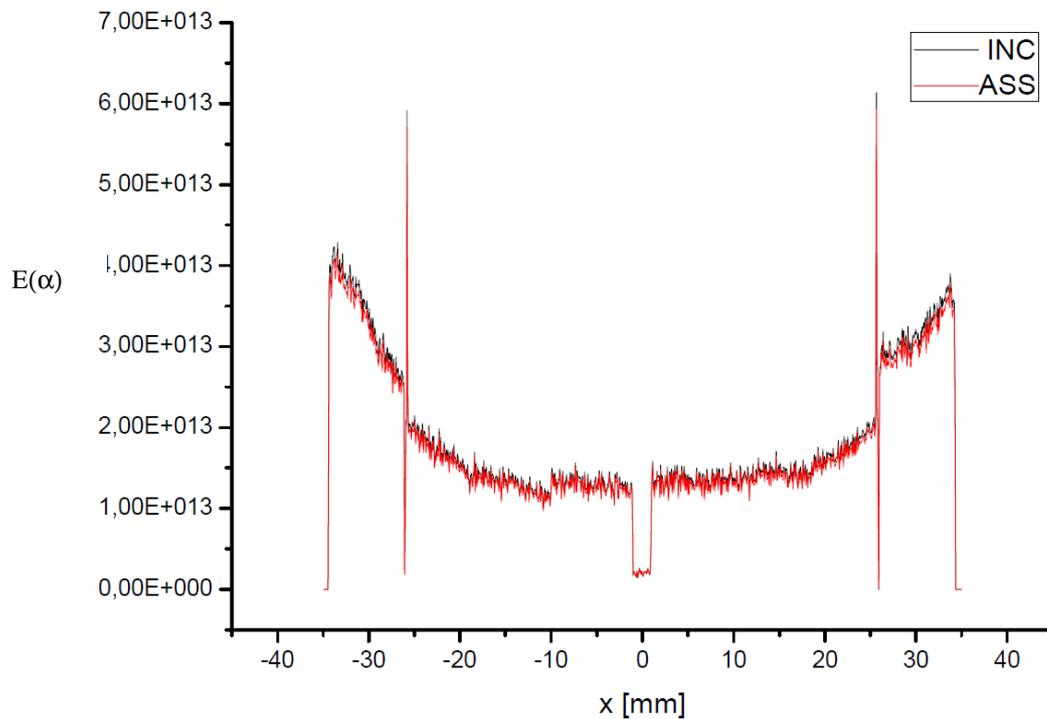
**Grafico 6.8** – Valore medio dell'irradianza effettiva dei raggi incidenti sul tubo ricevitore

Ora eseguiamo la mappatura della superficie considerando solamente la parte assorbita (Grafico 6.9).



**Grafico 6.9** – Valore medio dell'irradianza dei raggi assorbiti del tubo ricevitore

Comparando i grafici dei raggi incidenti ed assorbiti è possibile mettere in evidenza la differenza presente fra la radiazione incidente e quella assorbita, mostrata nel Grafico 6.10.



**Grafico 6.10** –Confronto fra Grafico 6.8 e 6.9

Gli allegati con il foglio di calcolo Origin per tutte le curve presentate ( Grafici 6.8 - 6.9 ) sono contenuti negli allegati:

1. “Allegato digitale D – Mappa d’irradianza tubo ricevitore reale con fascio incidente a  $45^\circ$ ”;
2. “Allegato digitale D1 – Mappa d’irradianza INC tubo ricevitore reale con fascio incidente a  $45^\circ$ ”;
3. “Allegato digitale D2 – Mappa d’irradianza ASS tubo ricevitore reale con fascio incidente a  $45^\circ$ ”.

## 6.4 Rendimento Concentratore

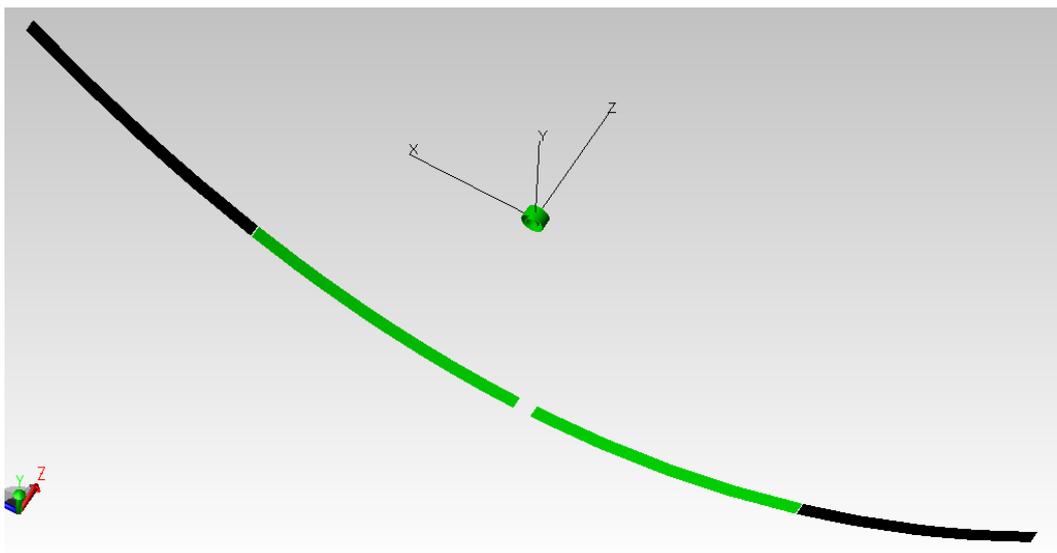
Per valutare il rendimento del concentratore, si prenda in esame un modello di concentratore con il tubo ricevitore avente proprietà d'assorbanza uguali a 1, chiamato "modello semplice", ed un modello di concentratore avente proprietà d'assorbanza reali, citate nel paragrafo 2.4 chiamato "modello semplice con R reale". In entrambi i modelli lo specchio è impostato con proprietà reali e non è considerata la presenza del tubo di vetro; in tal modo non teniamo conto delle perdite per riflessione e assorbimento dovute alla presenza del tubo di vetro.

### 6.4.1 Angolo d'incidenza di 0°

I raggi verranno riflessi sullo specchio con proprietà della superficie uguali a quelle del materiale indicate nel Capitolo 2.4, con angolo d'incidenza di 0°.

Il ray tracing eseguito in entrambi i modelli considera un numero di raggi pari a 3-milioni che colpiscono lo specchio e vengono riflessi verso la superficie cilindrica del ricevitore di diametro pari a 70 mm.

Consideriamo una sezione trasversale dello specchio parabolico di lunghezza 5900 mm e larghezza 70 mm. Lo specchio è diviso in quattro parti, come illustrato in Figura 6.10:



**Figura 6.10** – Vista panoramica sezione concentratore

La superficie che rappresenta il sole, simulato da un corpo nero, irradia sulla superficie considerata un flusso luminoso di  $\phi_{\text{SOL}}(0^\circ) = 1.65621 \cdot 10^{10} \text{ W}$  con un lunghezza d'onda media di  $\lambda = 0.812442 \text{ }\mu\text{m}$ . Questa stessa potenza è quella in ingresso al concentratore.

Per conoscere il flusso incidente sul tubo ricevitore ( $\phi_{\text{RIC-INC}}(0^\circ)$ ) ho dapprima rilevato direttamente il flusso assorbito dalla superficie del ricevitore nel modello semplice.

$$\phi_{\text{RIC-INC}}(0^\circ)' = 1.5919 \cdot 10^{10} \text{ W}$$

Il flusso misurato sul ricevitore (incidente) deve corrispondere alla somma dei flussi riflessi dalle quattro sezioni dello specchio parabolico. Il flusso complessivo riflesso dallo specchio parabolico si ottiene dalla differenza tra il flusso totale incidente ( $\phi_{\text{SPE-TOT-INC}}(0^\circ)$ ) e il flusso totale assorbito ( $\phi_{\text{SPE-TOT-ASS}}(0^\circ)$ ). Questi due flussi sono calcolati per ciascuna sezione dello specchio e sono dati dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{SPE-TOT-INC}}(0^\circ) &= \phi_{\text{SPE1-INC}}(0^\circ) + \phi_{\text{SPE2-INC}}(0^\circ) + \phi_{\text{SPE3-INC}}(0^\circ) + \phi_{\text{SPE4-INC}}(0^\circ) = \\ &= 3.78276 \cdot 10^9 + 3.77324 \cdot 10^9 + 4.33806 \cdot 10^9 + 4.34059 \cdot 10^9 \quad \text{Equazione 6.5} \\ &= 16.23465 \cdot 10^9 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_{\text{SPE-TOT-ASS}}(0^\circ) &= \phi_{\text{SPE1-ASS}}(0^\circ) + \phi_{\text{SPE2-ASS}}(0^\circ) + \phi_{\text{SPE3-ASS}}(0^\circ) + \phi_{\text{SPE4-ASS}}(0^\circ) = \\ &= 7.32823 \cdot 10^7 + 7.34673 \cdot 10^7 + 8.42522 \cdot 10^7 + 8.43013 \cdot 10^7 = \quad \text{Equazione 6.6} \\ &= 31.53031 \cdot 10^7 \text{ W} \end{aligned}$$

A questo punto, ottenuti questi due valori, la differenza tra questi dà il flusso incidente sul ricevitore:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{RIC-INC}}(0^\circ)'' &= \phi_{\text{SPE-TOT-INC}}(0^\circ) - \phi_{\text{SPE-TOT-ASS}}(0^\circ) = \\ &= 16.23465 \cdot 10^9 - 31.53031 \cdot 10^7 = 1.5919 \cdot 10^{10} \text{ W} \quad \text{Equazione 6.7} \end{aligned}$$

Il flusso incidente sul ricevitore, misurato o calcolato a partire dal flusso riflesso dallo specchio, dà lo stesso risultato come era da aspettarsi.

$$\phi_{\text{RIC-INC}}(0^\circ)' = \phi_{\text{RIC-INC}}(0^\circ)''$$

Per calcolare il rendimento delle singole parti del concentratore è necessario conoscere i valori di entrata e d'uscita dei flussi e dei raggi. Il rendimento si calcola:

$$\eta = \frac{\phi_{USCENTE}}{\phi_{ENTRANTE}} \quad \text{Equazione 6.8}$$

Per calcolare il rendimento dello specchio è necessario rapportare il flusso uscente dallo specchio ( $\phi_{USCENTE}$ ), corrispondente al flusso in entrata sul tubo ricevitore, con il flusso solare incidente sullo specchio ( $\phi_{ENTRANTE}$ ). Quindi secondo l'Equazione 6.8:

$$\eta_{SPE(0^\circ)} = \frac{\phi_{RIC-INC(0^\circ)}}{\phi_{SOL(0^\circ)}} = \frac{1.5919 \cdot 10^{10} W}{1.65621 \cdot 10^{10} W} = 0.9612 \quad \text{Equazione 6.9}$$

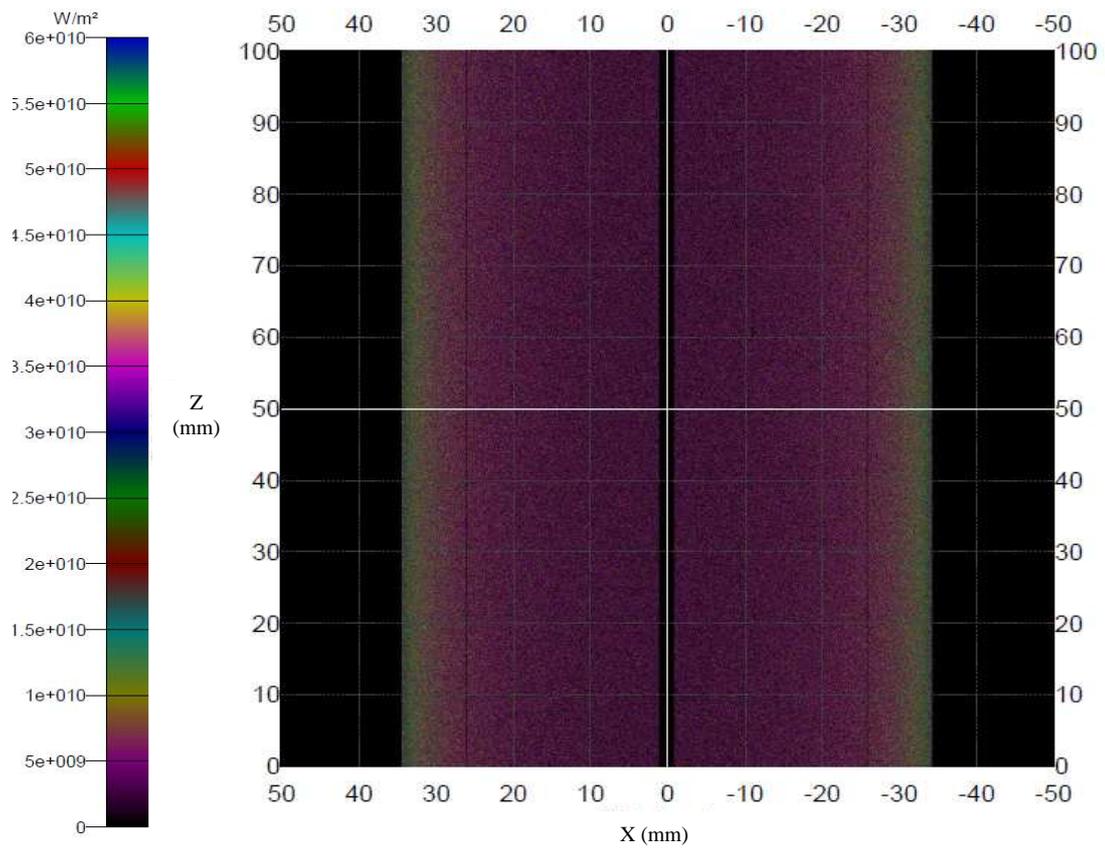
Dal calcolo del rendimento dello specchio risulta il valore 0.9612, leggermente inferiore a quello che ci si aspetterebbe considerando la semplice curva di riflettenza del grafico 2.1. Questa, infatti, ha un valore mediamente maggiore a 0.97 e quindi, anche quando pesate con lo spettro solare, dovrebbe dare dei valori di riflettenza efficace maggiori di 0.97.

La spiegazione di ciò è la presenza non trascurabile delle varie fenditure, che non concorrono alla riflessione della luce solare.

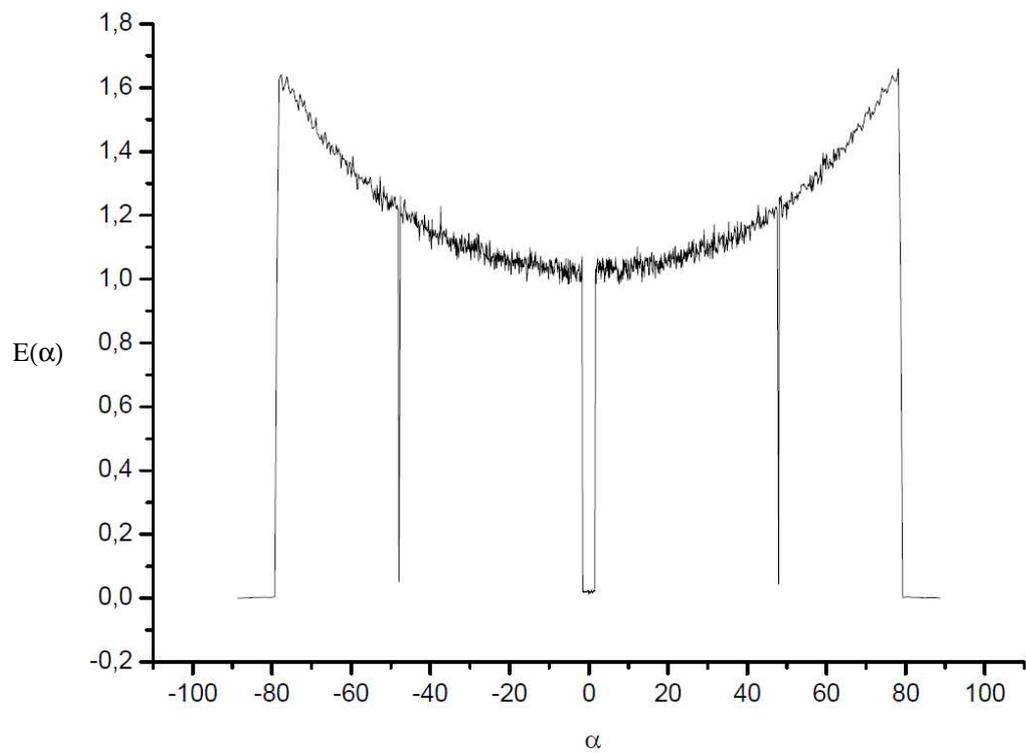
Per valutare il rendimento del tubo ricevitore bisogna rapportare il flusso assorbito dal tubo ricevitore ( $\phi_{USCENTE}$ ), con le proprietà del materiale e del coating citate nel paragrafo 2.4, con il flusso incidente sul tubo ricevitore ( $\phi_{ENTRANTE}$ ).

Consideriamo a tale proposito il modello semplice con R reale.

La mappa d'irradianza del modello semplice con R reale ed il relativo diagramma, corretto dagli effetti della proiezione, sono esaminabili in Figura 6.11 e nel Grafico 6.11.



**Figura 6.11** - Mappa d'irradianza della superficie del tubo ricevitore con A reale in assenza del tubo di vetro



**Grafico 6.11** - Valore medio dell'irradianza dei raggi incidenti sul tubo ricevitore con assorbanza reale in assenza del tubo di vetro

Il flusso assorbito dal tubo d'acciaio nel modello semplice con R reale,  $\phi_{RIC-ASS}(0^\circ)$ , ha un valore pari a  $1.4991 \cdot 10^{10}$  W , ricavato dalla mappa d'irradianza mostrata in Figura 6.8

Il rendimento del tubo ricevitore sarà allora dato da:

$$\eta_{TUBO}(0^\circ) = \frac{\phi_{RIC-ASS}(0^\circ)}{\phi_{RIC-INC}(0^\circ)} = \frac{1.4991 \cdot 10^{10} \text{ W}}{1.5919 \cdot 10^{10} \text{ W}} = 0.9417 \quad \text{Equazione 6.10}$$

Il rendimento totale del concentratore ( $\eta_{TOT}(0^\circ)$ ) per il modello semplice reale sarà dato dal rapporto tra il flusso assorbito dal tubo ricevitore ( $\phi_{USCENTE}$ ), ed il flusso solare incidente sullo specchio ( $\phi_{ENTRANTE}$ ).

$$\eta_{TOT}(0^\circ) = \frac{\phi_{RIC-ASS}(0^\circ)}{\phi_{SOL}(0^\circ)} = \frac{1.4991 \cdot 10^{10} \text{ W}}{1.65621 \cdot 10^{10} \text{ W}} = 0.905 \quad \text{Equazione 6.11}$$

Il flusso riflesso sul tubo ricevitore ( $\phi_{RIC-RIFL}(0^\circ)$ ) è dato dalla differenza tra il flusso incidente ( $\phi_{RIC-INC}(0^\circ)$ ) ed il flusso assorbito ( $\phi_{RIC-ASS}(0^\circ)$ ) dal tubo ricevitore.

$$\begin{aligned} \phi_{RIC-RIFL}(0^\circ) &= \phi_{RIC-INC}(0^\circ) - \phi_{RIC-ASS}(0^\circ) = 1.59193469 \cdot 10^{10} - 1.4991 \cdot 10^{10} \text{ W} = \\ &= 9.28347 \cdot 10^8 \text{ W} \end{aligned}$$

**Equazione 6.11**

### 6.4.1 Angolo d'incidenza di 45°

I raggi verranno riflessi sullo specchio con proprietà della superficie uguali a quelle del materiale indicate nel Capitolo 2.4, con angolo d'incidenza di 45°.

Il ray tracing eseguito in entrambi i modelli considera un numero di raggi pari a 3-milioni che colpiscono lo specchio e vengono riflessi verso la superficie cilindrica del ricevitore di diametro pari a 70 mm.

Consideriamo una sezione trasversale dello specchio parabolico di larghezza 5900 mm e lunghezza 4800 mm, pari a 4 file di specchi, ed una parte del tubo di lunghezza 2000 mm, divisa in 20 sezioni di lunghezza 100 mm ciascuna (Figura 6.12).

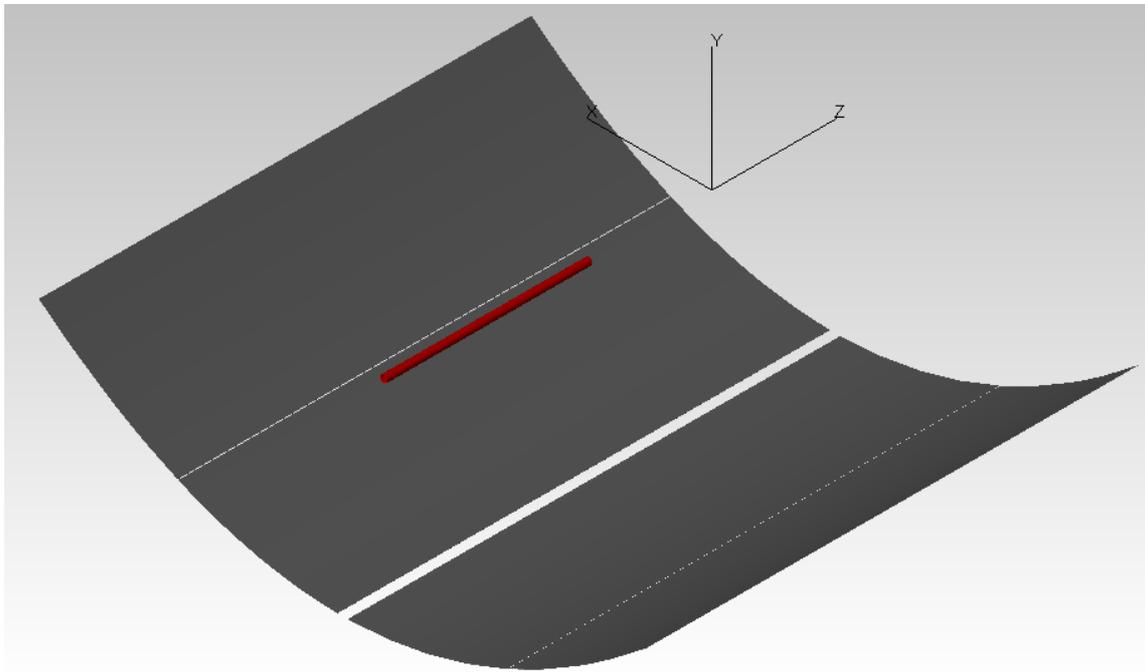


Figura 6.12 – Vista panoramica sezione concentratore considerato

La superficie che rappresenta il sole, simulato da un corpo nero, irradia sulla superficie considerata un flusso luminoso di  $\phi_{SOL(45^\circ)} = 2.83934 \cdot 10^{11} \text{ W}$  con un lunghezza d'onda media di  $\lambda = 0.812442 \mu\text{m}$ . Questa stessa potenza è quella in ingresso al concentratore.

Per conoscere il flusso incidente sul tubo ricevitore ( $\phi_{RIC-INC(45^\circ)}$ ) ho rilevato direttamente il flusso assorbito dalla superficie del ricevitore nel modello semplice, confrontato con quello uscente dallo specchio.

$$\phi_{RIC-INC(45^\circ)}' = 1.274842 \cdot 10^{11} \text{ W}$$

Per calcolare il rendimento dello specchio è necessario rapportare il flusso uscente dallo specchio ( $\phi_{USCENTE}$ ), corrispondente al flusso in entrata sul tubo ricevitore, con il flusso solare incidente sullo specchio ( $\phi_{ENTRANTE}$ ). Quindi secondo l'Equazione 6.8:

$$\eta_{SPE(45^\circ)} = \frac{\phi_{RIC-INC(45^\circ)}}{\phi_{SOL(45^\circ)}} = \frac{1.274842 \cdot 10^{11} \text{ W}}{2.83934 \cdot 10^{11} \text{ W}} = 0.44899 \quad \text{Equazione 6.12}$$

Per valutare il rendimento del tubo ricevitore bisogna rapportare il flusso assorbito dal tubo ricevitore ( $\phi_{USCENTE}$ ), con le proprietà del materiale e del coating citate nel paragrafo 2.4, con il flusso incidente sul tubo ricevitore ( $\phi_{ENTRANTE}$ ).

Consideriamo a tale proposito il modello semplice con R reale.

Il flusso assorbito dal tubo d'acciaio nel modello semplice con R reale,  $\phi_{RIC-ASS(45^\circ)}$ , ha un valore pari a  $7.484095 \cdot 10^{10}$  W.

Il rendimento del tubo ricevitore sarà allora dato da:

$$\eta_{TUBO(45^\circ)} = \frac{\phi_{RIC-ASS(45^\circ)}}{\phi_{RIC-INC(45^\circ)}} = \frac{7.484095 \cdot 10^{10} \text{ W}}{1.274842 \cdot 10^{11} \text{ W}} = 0.5871 \quad \text{Equazione 6.13}$$

Il rendimento totale del concentratore ( $\eta_{TOT(45^\circ)}$ ) per il modello semplice reale sarà dato dal rapporto tra il flusso assorbito dal tubo ricevitore ( $\phi_{USCENTE}$ ), ed il flusso solare incidente sullo specchio ( $\phi_{ENTRANTE}$ ).

$$\eta_{TOT(45^\circ)} = \frac{\phi_{RIC-ASS(45^\circ)}}{\phi_{SOL(45^\circ)}} = \frac{7.484095 \cdot 10^{10} \text{ W}}{2.83934 \cdot 10^{11} \text{ W}} = 0.263587 \quad \text{Equazione 6.14}$$

Il flusso riflesso sul tubo ricevitore ( $\phi_{RIC-RIFL(45^\circ)}$ ) è dato dalla differenza tra il flusso incidente ( $\phi_{RIC-INC(45^\circ)}$ ) ed il flusso assorbito ( $\phi_{RIC-ASS(45^\circ)}$ ) dal tubo ricevitore.

$$\begin{aligned} \phi_{RIC-RIFL(45^\circ)} &= \phi_{RIC-INC(45^\circ)} - \phi_{RIC-ASS(45^\circ)} = 1.274842 \cdot 10^{11} - 7.484095 \cdot 10^{10} \text{ W} = \\ &= 5.264325 \cdot 10^{10} \text{ W} \end{aligned}$$

**Equazione 6.15**

## **Capitolo 7: Modellazione ottica del collettore in presenza di un cilindro virtuale che simula il radiometro**

In questo capitolo modelliamo il concentratore in presenza del radiometro mobile. Il radiometro come già descritto nel Capitolo 3, è equipaggiato con una serie di coppie di sensori posizionate sia nella parte anteriore che posteriore della struttura mobile (vedi Figura 4.5). Le coppie dei sensori hanno lo scopo di misurare contemporaneamente il flusso in arrivo sulla zona del ricevitore. Per maggiori precisazioni, è illustrato nella Figura 3.2 il meccanismo di misura della radiazione concentrata.

Ciascun sensore di una coppia, nel suo moto di traslazione e rotazione attorno all'asse del ricevitore, traccia una superficie elicoidale la cui larghezza dipende dall'inclinazione delle ruote motrici rispetto ad un asse trasversale al tubo ricevitore. La superficie tracciata dal singolo sensore sarà una frazione  $n$ -esima della superficie totale del cilindro virtuale, essendo  $n$  le coppie di sensori posizionate da ciascuna parte della struttura. In tal modo l'azione combinata dei sensori permette di tracciare, e quindi mappare, l'intera superficie del cilindro virtuale corrispondente.

Naturalmente, l'uso di più sensori ha il vantaggio di ridurre la velocità rotazionale del radiometro a parità di velocità d'avanzamento lungo l'asse, ovvero a parità di tempo stabilito per la mappatura di una sezione del tubo. La larghezza della traccia  $t$  lasciata dal singolo sensore sulla superficie virtuale è data da  $t = L \cdot (\sin \vartheta + \cos \vartheta)$ , dove  $L$  è la lunghezza del lato del sensore. Essa raggiunge il valore massimo a  $L \cdot \sqrt{2}$  in corrispondenza di  $\vartheta = 45^\circ$ . Fissato  $\vartheta$ , è fissato il rapporto tra la velocità di rotazione angolare  $\omega$  e la velocità di traslazione  $v_T$  lungo il tubo secondo l'espressione:

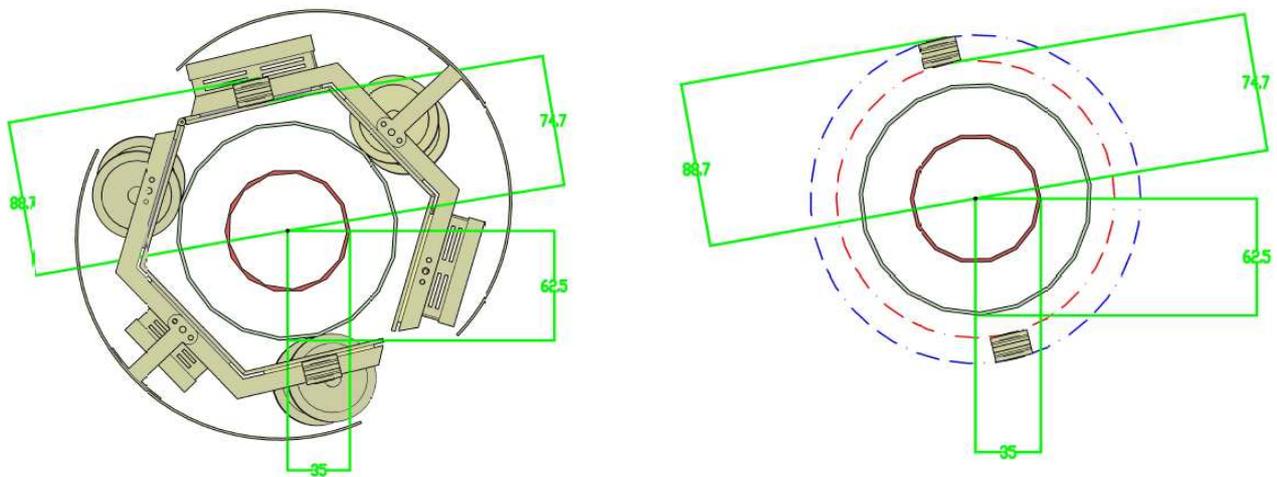
$$\frac{\omega}{v_T} = \frac{1}{R \tan \vartheta} \quad \text{Equazione 7.1}$$

Con  $R$  raggio del cilindro virtuale.

Quindi, usando più sensori si può ridurre  $\vartheta$  e quindi anche la velocità angolare a parità di  $v_T$ . L'azione dei due sensori è mostrata in Figura 3.1.

La distanza tra la superficie del tubo d'acciaio e la cella solare interna, sensore interno del radiometro, è di 39.7 mm; mentre il sensore esterno dista dal tubo d'acciaio 53.7 mm.

In questo capitolo verrà associato al concentratore un doppio cilindro virtuale che simula il percorso elicoidale svolto da ciascuna coppia di sensori del radiometro attorno al tubo ricevitore (vedi Figura 7.1). Verranno create due superfici virtuali, di raggio  $R_I = 74.7$  mm e  $R_E = 88.7$  mm associate rispettivamente al sensore interno (cerchio rosso in Figura 7.1) e al sensore esterno (cerchio blu in Figura 7.1) di ciascuna coppia di sensori.



**Figura 7.1** – Misure delle celle solari, del tubo di vetro e del ricevitore

Il sensore esterno ha lo scopo di misurare il flusso in arrivo sul ricevitore, mentre il sensore interno il flusso riflesso del ricevitore. Dalla differenza tra i due flussi si ottiene il flusso netto assorbito dal ricevitore in ciascun punto.

Integrando il flusso assorbito in ogni punto su tutta la superficie del cilindro virtuale si ottiene il flusso assorbito totale che, diviso per il flusso totale incidente dà il rendimento globale del concentratore.

Oltre a ciò, la mappa del flusso assorbito fornisce informazioni sul rendimento locale del concentratore, in tal modo è possibile capire se sono presenti perdite d'efficienza dovute ad esempio ad imperfezioni sullo specchio parabolico o a disallineamenti tra specchio e tubo.

Lo scopo della superficie virtuale, creata nel software, serve a verificare se la misura dei flussi su di essa fornisce il flusso effettivamente assorbito dal tubo d'acciaio.

Consideriamo ora il sensore esterno. Lo scopo della sensore esterno è di misurare il flusso in arrivo verso il tubo ricevitore. Consideriamo dunque la superficie virtuale esterna.

Controlliamo che il flusso incidente sulla superficie virtuale esterna,  $\phi_{SVE-INC}$ , coincida con quella incidente sul tubo ricevitore,  $\phi_{RIC-ASS}$ .(caso di allineamento perfetto). Il valore ricavato è:

$$\phi_{SVE-INC} = 1.60084 \cdot 10^{10} \text{ W}$$

Consideriamo ora il sensore interno. Lo scopo della sensore interno è di misurare il flusso riflesso dal tubo ricevitore, quindi dobbiamo studiare la superficie virtuale interna. È possibile ricavare il flusso riflesso dal tubo ricevitore non interagendo con esso e di conseguenza comprovare che la presenza del radiometro quantificherebbe il rendimento del concentratore.

Esaminiamo la superficie virtuale interna nel caso che essa non possieda nessuna proprietà, in modo tale da misurare il flusso passante attraverso la superficie, senza interagire con i raggi. Il tubo ricevitore deve avere le proprietà relative al suo materiale, in tal modo è possibile, attraverso una semplice equazione matematica, determinare il flusso riflesso dal tubo ricevitore. Infatti, il flusso incidente passante sulla superficie virtuale, è dato dalla somma del flusso incidente sul ricevitore ed il flusso riflesso dal ricevitore, tale che  $\phi_{SVI-INC-PAS} = \phi_{SVI-RIFL} + \phi_{SVI-ASS}$ . Il flusso incidente passante risulta uguale a  $\phi_{SVI-INC-PAS} = 1.7308 \cdot 10^{10}$ .

Per comprovare la teoria, è necessario considerare il caso che tutto il flusso incidente venga assorbito dal dalla superficie virtuale. Per far ciò, consideriamo la superficie virtuale interna come una superficie perfettamente assorbente. Il valore trovato è pari a  $\phi_{SVI-ASS} = 1.6364 \cdot 10^{10}$ .

Il flusso riflesso sulla superficie virtuale interna sarà allora:

$$\begin{aligned} \phi_{SVI-RIFL} &= \phi_{SVI-INC-PAS} - \phi_{SVI-ASS} = \\ &= 1.7308 \cdot 10^{10} - 1.6364 \cdot 10^{10} = 9.44 \cdot 10^8 \text{ W} \end{aligned} \quad \text{Equazione 7.2}$$

Il valore risultante è molto simile al valore riferito al flusso riflesso sul tubo  $\phi_{RIC-RIFL} = 9.28347 \cdot 10^8 \text{ W}$ . La differenza tra questi valori è dovuta al fatto che il flusso diretto dalla superficie solare, nel caso della misurazione effettuata con le superfici virtuali non viene sottratta, a differenza del valore misurato direttamente sul tubo ricevitore.

Essendo  $\phi_{RIC-RIFL} = 9.28347 \cdot 10^8 \text{ W} \cong 9.44 \cdot 10^8 \text{ W} = \phi_{SVI-RIFL}$  si è dimostrato che la presenza del radiometro può ricavare correttamente il rendimento e l'efficienza del concentratore senza compromettere l'integrità del sistema.

Calcoliamo ora i rispettivi rendimenti:

$$\eta_{SPE} = \frac{\phi_{SVE-INC}}{\phi_{SOL}} = \frac{1.60084 \cdot 10^{10} \text{ W}}{1.65621 \cdot 10^{10} \text{ W}} = 0.9665 \quad \text{Equazione 7.3}$$

$$\eta_{TUBO} = \frac{\phi_{SVE-INC} - \phi_{SVI-INC}}{\phi_{SVE-INC}} = \frac{\phi_{SVE-ASS}}{\phi_{SVE-INC}} = \frac{1.60084 \cdot 10^{10} \text{ W} - 9.44 \cdot 10^8 \text{ W}}{1.60084 \cdot 10^{10} \text{ W}} = \frac{1.50644 \cdot 10^{10} \text{ W}}{1.60084 \cdot 10^{10} \text{ W}} = 0.941 \quad \text{Equazione 7.4}$$

$$\eta_{TOT} = \frac{\phi_{SVE-ASS}}{\phi_{SOL}} = \frac{1.50644 \cdot 10^{10} \text{ W}}{1.65621 \cdot 10^{10} \text{ W}} = 0.9095 \quad \text{Equazione 7.5}$$

I valori calcolati sono in buon accordo con i valori ricavati precedentemente agendo sul tubo ricevitore. Per la precisione i dati referenti alle due unità di misura vengono confrontati fra loro nella tabella 7.1.

	<b>RICEVITORE</b>	<b>SUPERFICIE VIRTUALE</b>
<b><math>\eta_{SPECCHIO}</math></b>	0.9612	0.9665
<b><math>\eta_{TUBO}</math></b>	0.9417	0.941
<b><math>\eta_{TOT}</math></b>	0.905	0.9095

**Grafico 7.1** – Confronto tra i  $\eta$

## **Conclusioni**

### ***Risultati raggiunti***

Con il presente progetto si è cercato di simulare il comportamento di un radiometro mobile operante su un concentratore termodinamico di tipo “trough”, analizzando il flusso che i sensori interni ed esterni di questo strumento misurano. Questo lavoro di tesi di Laurea, associato a quello eseguito dall’Ing. Moretti che ha svolto il progetto di lavoro dello stesso, ha lo scopo di studiare la funzionalità dello strumento attraverso una modellazione ottica, allo scopo di spingere un gradino più in alto ciò che attualmente rappresenta lo stato dell’arte nel campo della radiometria mobile applicata a concentratori termodinamici cilindrici.

Le basi per raggiungere tale scopo, formate da miglorie a quanto già disponibile ed a nuove soluzioni in grado di ampliare le funzionalità dello strumento, risultano essere valide in via teorica.

Tramite la presente tesi si è cercato di definire la conferma di quanto teoricamente valido riguardante la misurazione del flusso luminoso entrante ed uscente dal tubo ricevitore. A partire dal segnale dei fotorivelatori dei sensori è stata estratta l’informazione temporale del flusso netto assorbito dal ricevitore e tramite i dati relativi a distanza percorsa ed inclinazione, è stato possibile riferire ogni misura di flusso all’esatta posizione in cui è stata effettuata, realizzando in tal modo una mappatura del flusso luminoso assorbito dal tubo ricevitore.

Tale mappatura sarà usata, in fase di collaudo, per la valutazione dell’efficienza ottica di collezione dell’impianto e per il controllo dell’uniformità del flusso concentrato dagli specchi parabolici, individuando in tal modo eventuali disallineamenti e/o imperfezioni del riflettore primario; essa sarà utile altresì per il controllo periodico della funzionalità dell’impianto.

Le simulazioni che sono state effettuate in questa tesi confermano quanto teoricamente affermato, infatti si è comprovato che il rendimento misurato dal radiometro conferma quello reale.

Se da ulteriori test e prove eseguite, lo strumento dovesse rivelarsi valido ed in grado di porsi quale standard di riferimento del settore, sarà possibile ed auspicabile provvedere ad una sua parziale riprogettazione in chiave di contenimento dei costi, di semplificazione e di eventuali miglorie derivanti dalla fase di test, al fine di permetterne la produzione industriale. Tale produzione, sebbene in piccola scala, essendo il campo d’impiego una nicchia, potrebbe trovare nel futuro prossimo interessanti impieghi commerciali, soprattutto in previsione dell’attuazione del progetto “Desertec”.

A causa dell'assenza di uno strumento simile, per principio di funzionamento e forma, a quanto progettato, e per il necessario sviluppo di alcune sue parti in sede realizzativa, la bontà del progetto dovrà essere valutata previa realizzazione e messa a punto dello stesso, e ad una sua prova sul campo, in grado di metterne in luce le reali qualità e gli eventuali limiti e/o difetti. Inoltre, dal seguente progetto sono state riscontrate caratteristiche che possono essere cambiate al fine di migliorare il radiometro stesso. Un perfezionamento può riguardare l'accostare maggiormente le celle solari al tubo di vetro al fine di disperdere la minor quantità possibile di flusso luminoso, oppure di disporre i due sensori di ciascuna coppia in posizione planare allo scopo di avere uno solo cilindro virtuale su cui effettuare le misure di flusso.

## **Allegati**

- Allegato digitale A – Indici
- Allegato digitale B1 – Concentratore
- Allegato digitale B2 – Radiometro
- Allegato digitale C – Mappa d’irradianza tubo ricevitore reale
- Allegato digitale D – Confronto tra modello teorico e reale

## **Bibliografia**

- C. Oleari (a cura di): *Misurare il colore* Hoepli 1998
- Rapporti tecnici ENEA riguardanti “*calore ad alte temperature ad energia solare*”
- Ing. A. Moretti, tesi di laurea “*Progetto di un prototipo di radiometro mobile per collettori solari termodinamici cilindrici*”.
- Programma di modellazione di sistemi ottici “TracePro”
- Programma di disegno e progettazione tridimensionale “AutoCAD”
- A. Parretta, A. Moretti; “Radiometro mobile per concentratori solari termodinamici cilindrici”; Brevetto It. Appl. N. RM2011A000343, 30/06/2011

## ***Ringraziamenti***

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Parretta per i preziosi insegnamenti e il tempo dedicato alla mia tesi.

Intendo poi ringraziare il dott. Marco Montecchi dell'ENEA di Casaccia per i preziosi dati utili alla realizzazione della tesi e l'Ing. Walter Gaggioli dell'ENEA di Casaccia per la disponibilità e il tempo concesso per avermi fatto visitare l'impianto di concentrazione presso la struttura di ricerca dell'ENEA di Casaccia.

Inoltre, ho desiderio di ringraziare con grande affetto i miei genitori, mio fratello e tutta la mia famiglia, per il sostegno che mi hanno dato ed aver creduto in me fino al traguardo oggi raggiunto.

Infine, porgo i miei ringraziamenti a tutti i miei amici che mi hanno supportato nel percorso che mi hanno permesso di arrivare fino a questo punto della mia vita.