



Ricerca di Sistema elettrico

## Sviluppo e sperimentazione di un prototipo di radiometro per la caratterizzazione del flusso solare in ricevitori a geometria cilindrica

V. Sabatelli, C. Copeta, A. Bruno, D. Marano

SVILUPPO E SPERIMENTAZIONE DI UN PROTOTIPO DI RADIOMETRO PER LA CARATTERIZZAZIONE DEL FLUSSO SOLARE IN RICEVITORI A GEOMETRIA CILINDRICA

V. Sabatelli, C. Copeta, A. Bruno, D. Marano (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione

Obiettivo: Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura

Responsabile del Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 OBIETTIVI GENERALI .....	5
1.2 OBIETTIVI SPECIFICI RELATIVI ALLA LINEA DI ATTIVITÀ B: FACILITY PER LA CARATTERIZZAZIONE DI COMPONENTI SOLARI PER APPLICAZIONI A MEDIA ED ALTA TEMPERATURA .....	6
1.3 OBIETTIVI E ARTICOLAZIONE DEL DOCUMENTO .....	7
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	7
2.1 DEFINIZIONE DELLA METODICA SPERIMENTALE DI MISURA DEL FLUSSO SOLARE CONCENTRATO IN COLLETTORI DEL TIPO LINE- FOCUSING .....	8
2.1.1 <i>Analisi del flusso solare concentrato al variare della divergenza angolare del fascio solare</i> .....	10
2.1.2 <i>Analisi del flusso solare concentrato al variare della distanza dal piano focale</i> .....	13
2.2 VERIFICA DELLA METODICA DI MISURA MEDIANTE PROVE SPERIMENTALI PRELIMINARI SU UN SISTEMA DEL TIPO POINT-FOCUSING..	16
2.2.1 <i>Apparato sperimentale e relativa caratterizzazione</i> .....	17
2.2.2 <i>Analisi ottiche preliminari</i> .....	18
2.2.3 <i>Risultati delle prove sperimentali</i> .....	20
2.3 MESSA A PUNTO DI UN RADIOMETRO TOTALMENTE AUTOMATIZZATO PER LA MISURA DELLA RADIAZIONE CONCENTRATA SU SISTEMI PARABOLICI LINEARI CON RICEVITORE A GEOMETRIA CILINDRICA.....	22
2.3.1 <i>Ingegnerizzazione del dispositivo</i> .....	24
3 CONCLUSIONI.....	31
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	31

## Sommario

Nel presente lavoro sono state analizzate le problematiche connesse alla misura diretta del flusso solare concentrato in collettori del tipo Line-Focusing (ossia sistemi parabolici lineari o sistemi a specchi lineari di Fresnel). In particolare sono state affrontate le problematiche connesse alla misura in campo del flusso solare concentrato su un ricevitore a geometria cilindrica per il quale, non potendosi misurare la distribuzione di flusso angolare e longitudinale direttamente sul piano focale (corrispondente alla superficie esterna del tubo assorbitore che è racchiuso all'interno del tubo in vetro), è stato necessario mettere a punto una metodica sperimentale di analisi che, attraverso la misura del flusso solare effettuata ad una certa distanza dal piano focale, consente di risalire a quella che effettivamente raggiunge il tubo ricevitore. A supporto della definizione della metodica di misura sperimentale elaborata, sono state condotte delle prove preliminari anche su un sistema del tipo Point-Focusing (ossia sistemi a disco di piccole dimensioni per applicazioni solo termiche o ibride, quali i sistemi Dish/Stirling) al fine di valutare preliminarmente la bontà delle scelte operate.

Riguardo la misura diretta del flusso concentrato su sistemi Line-Focusing, sono state analizzate e definite le specifiche tecniche per la realizzazione e messa a punto di un radiometro totalmente automatizzato per la misura della radiazione concentrata su sistemi parabolici lineari con ricevitore a geometria cilindrica. Tale dispositivo consente di mappare radialmente e longitudinalmente la distribuzione del flusso concentrato su tali tipologie di sistemi a concentrazione in accordo alla metodica sperimentale definita precedentemente.

## 1 Introduzione

Obiettivo del progetto a cui afferisce la presente attività (Progetto C.3: "UTILIZZO DEL CALORE SOLARE E AMBIENTALE PER LA CLIMATIZZAZIONE") è quello di mostrare come un utilizzo appropriato delle fonti di energia rinnovabile disponibili e l'adozione di sistemi produttivi integrati, in grado quindi di sfruttare in maniera ottimale tutti i flussi termici prodotti, possa consentire di ottenere risultati interessanti in termini di risparmio, efficienza energetica e salvaguardia ambientale.

Diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico sono attualmente focalizzate sullo studio di sistemi per la climatizzazione in ambito residenziale basati su tecnologie innovative che utilizzano fonti di energia alternative ed in particolare l'energia solare (sistemi di *solar heating & cooling*). L'impiego dell'energia solare nella stagione estiva per il condizionamento dell'aria costituisce infatti una soluzione tecnica molto interessante dal punto di vista energetico, vista la coincidenza della domanda di climatizzazione con la disponibilità di energia solare. Inoltre, lo sviluppo di tecnologie innovative di *solar heating & cooling*, caratterizzate da elevati livelli di produttività ed affidabilità, può consentire l'impiego di tali sistemi non solo in ambito residenziale ma anche in ambito industriale, dove è elevata la richiesta di produzione di calore e/o freddo a bassa e media temperatura eventualmente abbinata alla produzione di energia elettrica.

Ne consegue che oltre alla climatizzazione elio-assistita in ambito residenziale, le tecnologie solari termiche a bassa e media temperatura rappresentano un settore che può contribuire in maniera sostanziale allo sviluppo e diffusione di sistemi combinati per la produzione di calore ed elettricità (CHP-Combined Heat Power). In quest'ambito, una delle soluzioni tecnologiche più promettenti da indagare e sviluppare è rappresentata da sistemi integrati co- e tri-generativi di piccola taglia alimentati da fonti rinnovabili ed in particolare da energia solare, mediante collettori a concentrazione da abbinare a micro-turbine per la produzione congiunta di calore e/o freddo ed elettricità. La scelta della tecnologia solare a concentrazione più idonea per tale tipologia di applicazione, si baserà sul livello di temperatura di progetto dell'impianto, per cui potranno essere presi in considerazione diverse soluzioni tra quelle disponibili, che spaziano da sistemi basati su ottiche "non-imaging" del tipo a CPC, per impiaghi a più bassa temperatura, o da sistemi che utilizzano ottiche del tipo parabolico lineare e/o a specchi lineari di Fresnel, per applicazioni a medio-alta temperatura.

In quest'ambito, per valutare e rendere più performanti tali tecnologie emergenti sono state realizzate presso il Centro Ricerche ENEA di Trisaia alcune facility di prova che consentono di studiare, sperimentare e qualificare tali tipologie di componenti.

### 1.1 Obiettivi generali

In generale l'attività sulla climatizzazione innovativa si sviluppa su due linee di attività fondamentali, concentrando gli sforzi e le risorse verso la realizzazione di laboratori e lo sviluppo di componenti innovativi:

- la prima linea è quella dello sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo. In particolare vengono studiate pompe di calore ad assorbimento, pompe elettriche elio-assistite, heat pipe, pompe di calore a CO<sub>2</sub>, sistemi desiccant, pompe di calore geotermiche. A questo scopo si realizzano impianti prototipali, laboratori di qualificazione e si assicura la partecipazione a network di ricerca internazionali (IEA);
- la seconda linea di attività riguarda l'integrazione del sistema di climatizzazione, cioè la costruzione di sistemi integrati che possano essere robusti e competitivi assolvendo l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale e della produzione di acqua calda sanitaria. In questo contesto si sviluppano: sistemi integrati pilota e dimostratori dove tali sistemi sono integrati nell'edificio; sistemi di controllo ed ottimizzazione in linea della integrazione tra sistema di climatizzazione ed edificio e tele-diagnostica con sistemi di monitoraggio remoto.

Nell'ambito delle attività finalizzate allo sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento delle energie rinnovabili per il condizionamento estivo, rientra anche la **linea di attività B** dal titolo *“Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura”*.

## *1.2 Obiettivi specifici relativi alla linea di attività B: Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura*

Le attività afferenti alla linea B prevedono l'analisi, la sperimentale e la qualificazione di componenti solari a concentrazione ottimizzati per applicazioni a media temperatura da destinarsi ai settori della climatizzazione residenziale, commerciale e terziaria, alla produzione di freddo in ambito industriale e alla produzione di calore per alimentare processi co-generativi ad uso industriale.

Le attività proposte nella presente annualità riguardano:

- B1. Attività di caratterizzazione e sperimentazione di ricevitori ottimizzati per applicazioni solari termiche a media temperatura.** Nella passata annualità sono stati sviluppati e validati sperimentalmente diversi modelli matematici per la simulazione di ricevitori a geometria cilindrica relativi a concentratori parabolici lineari o del tipo Linear-Fresnel operanti a media temperatura. I modelli sviluppati hanno permesso di stimare con buona accuratezza il comportamento energetico delle diverse tipologie di concentratori solari termici in tutte le condizioni possibili di funzionamento. Dato l'elevato grado di accuratezza riscontrato, tali strumenti software potranno essere utilizzati a supporto della progettazione ottimizzata di componenti innovativi sia per quanto riguarda la parte ottica sia per quanto riguarda la parte termo-fluidodinamica. Più in dettaglio, sia per ricevitori da utilizzare in collettori parabolici lineari sia per ricevitori da utilizzare in sistemi Linear-Fresnel, potranno essere esaminate diverse geometrie innovative con l'obiettivo, rispetto allo stato attuale dell'arte, sia di ottenere rese ottiche migliorative sia di massimizzare i flussi termici lato fluido-termovettore e nel contempo minimizzare le perdite termiche.
- B2. Attività di sviluppo e sperimentazione di dispositivi per la misura diretta del flusso solare concentrato in collettori a media temperatura.** Come già evidenziato nella passata annualità, la stima delle performance termiche di un collettore a concentrazione passa attraverso la soluzione delle equazioni di bilancio termico e di massa del tubo ricevitore che necessitano per essere risolte della conoscenza della densità e della distribuzione angolare di potenza radiante sul tubo ricevitore. Tale dato, non essendo noto a priori come risultato di misure sperimentali, lo si deve stimare attraverso l'utilizzo di software di analisi ottica che consentono in prevedere la distribuzione e l'intensità della radiazione solare concentrata, note che siano le caratteristiche ottiche e fisiche dei materiali che compongono sia il sistema di concentrazione che il ricevitore. Nonostante l'elevata precisione ed attendibilità di tali strumenti di analisi ottica, la possibilità di poter misurare direttamente il flusso solare concentrato sul ricevitore rappresenta un obiettivo di importanza rilevante nella messa a punto di metodiche per la stima e l'ottimizzazione delle performance ottiche e termiche di un collettore a concentrazione. Ciò premesso, in continuità con quanto già fatto nella precedente annualità, nel corso della presente annualità sono state completate le attività di sviluppo, progettazione e realizzazione di dispositivi prototipali per la mappatura sperimentalmente del flusso solare concentrato in collettori a media temperatura, caratterizzati sia da ricevitori a geometria cilindrica sia da ricevitori a geometria piana. *L'attività di ricerca sopra descritta è stata svolta con il contributo dell'Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, che ha curato la parte inerente la misura diretta della radiazione solare concentrata su superfici piane.*

### 1.3 Obiettivi e articolazione del documento

Con riferimento all'**obiettivo B2** il presente documento riporta gli esiti delle attività di *sviluppo e sperimentazione di dispositivi per la misura diretta del flusso solare concentrato* in collettori a concentrazione di piccola taglia. In particolare sono state affrontate le tematiche della misura diretta della radiazione solare concentrata in sistemi a concentrazione per applicazioni a media temperatura nei settori sia residenziale, per la produzione di calore per la climatizzazione estiva degli edifici, sia industriale per la produzione di calore di processo a temperature fino a 250°C.

La misura del flusso solare concentrato è di primaria importanza qualora si voglia risolvere le equazioni di bilancio energetico in corrispondenza del ricevitore solare. Attualmente per poter scrivere tali equazioni di bilancio di massa ed energia è necessario stimare il flusso solare concentrato attraverso modelli di calcolo che, sebbene molto sofisticati e capaci di tenere presente tutti gli aspetti che caratterizzano i fenomeni ottici che si realizzano sul concentratore solare, non danno la certezza della correttezza delle valutazioni effettuate. Per superare tale ostacolo e disporre di dati sperimentali che consentano sia di scrivere equazioni di bilancio energetico realistiche sia di validare i diversi strumenti di calcolo ottico disponibili sul mercato, sono stati messi a punto dei dispositivi per la misura diretta della radiazione solare concentrata.

Per il raggiungimento di tale obiettivo sono state condotte le seguenti attività:

1. Definizione della metodica sperimentale di misura del flusso solare concentrato in collettori del tipo Line-Focusing
2. Verifica della metodica di misura mediante prove sperimentali preliminari su un sistema del tipo Point-Focusing
3. Messa a punto di un radiometro totalmente automatizzato per la misura della radiazione concentrata su sistemi parabolici lineari con ricevitore a geometria cilindrica.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

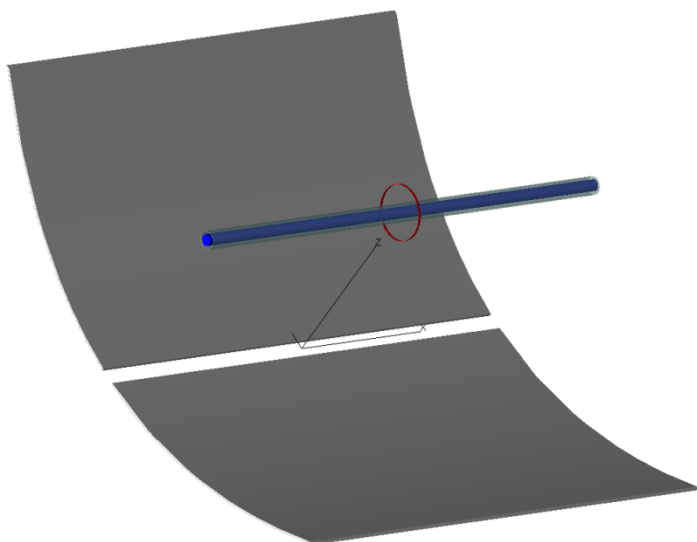
Nel presente lavoro sono state analizzate le problematiche connesse alla misura diretta del flusso solare concentrato in collettori del tipo Line-Focusing (ossia sistemi parabolici lineari o sistemi a specchi lineari di Fresnel). In particolare sono state affrontate le problematiche connesse alla misura in campo del flusso solare concentrato su un ricevitore a geometria cilindrica per il quale, non potendosi misurare la distribuzione di flusso angolare e longitudinale direttamente sul piano focale (corrispondente alla superficie esterna del tubo assorbitore che è racchiuso all'interno del tubo in vetro), è stato necessario mettere a punto una metodica sperimentale di analisi che, attraverso la misura del flusso solare concentrato effettuata ad una certa distanza dal piano focale, consente di risalire a quella che effettivamente raggiunge il tubo ricevitore.

A supporto della definizione della metodica di misura sperimentale elaborata, sono state condotte delle prove preliminari anche su un sistema del tipo Point-Focusing (ossia sistemi a disco di piccole dimensioni per applicazioni solo termiche o ibride, quali i sistemi Dish/Stirling) al fine di valutare preliminarmente la bontà delle scelte operate.

Riguardo la misura diretta del flusso concentrato su sistemi Line-Focusing, sono state analizzate e definite le specifiche tecniche per la realizzazione e messa a punto di un radiometro totalmente automatizzato per la misura della radiazione concentrata su sistemi parabolici lineari con ricevitore a geometria cilindrica. Tale dispositivo consente di mappare radialmente e longitudinalmente la distribuzione del flusso concentrato su tali tipologie di sistemi a concentrazione in accordo alla metodica sperimentale definita precedentemente.

## 2.1 Definizione della metodica sperimentale di misura del flusso solare concentrato in collettori del tipo Line-Focusing

La figura seguente mostra lo schema e le relative caratteristiche geometriche del concentratore parabolico lineare di piccola taglia oggetto delle valutazioni teorico-sperimentali che sono state eseguite al fine di mettere a punto la metodica per la misura del flusso solare concentrato e della sua distribuzione sul ricevitore.



**Tabella 1 – Principali caratteristiche geometriche del concentratore**

Apertura sistema ottico primario	2.37 m
Distanza focale	0.820 m
Altezza parabola	0.428 m
Angolo di bordo	72.68 °
Lunghezza specchi	6 m
Diametro esterno tubo assorbitore	42.4 mm
Diametro esterno tubo di vetro	70 mm

**Figura 1. Schema e principali caratteristiche del collettore oggetto delle analisi teorico-sperimentali**

In generale, la potenza termica  $Q_r$  incidente sul ricevitore di un concentratore può essere calcolata a partire dalla radiazione solare diretta DNI incidente sulla superficie di apertura  $A_a$  e dal corrispondente rendimento ottico di picco (ossia ottenuto in condizioni di incidenza normale dei raggi solari al piano di apertura), secondo la formula seguente:

$$Q_r = A_a \text{ DNI } \eta_{opt,\perp}$$

dove il rendimento ottico di picco è esprimibile attraverso la seguente relazione:

$$\eta_{opt,\perp} = \rho \tau \alpha F_I$$

dove:

- $\rho$  è il coefficiente di riflessione degli specchi utilizzati nel sistema ottico di concentrazione
- $\tau$  è il coefficiente di trasmissione del vetro di copertura del ricevitore
- $\alpha$  è il coefficiente di assorbimento del rivestimento selettivo del ricevitore
- $F_I$  è il fattore di intercettazione, definito come il rapporto tra la potenza incidente sulla superficie dell'assorbitore e la potenza riflessa dagli specchi

Quest'ultimo parametro, la cui caratterizzazione sperimentale è di primaria importanza nelle misure di flusso concentrato, tiene conto del fatto che non tutta la radiazione solare riflessa dal sistema ottico di concentrazione viene effettivamente intercettata dal ricevitore a causa di tutti quei fenomeni di non



idealità che caratterizzano un concentratore reale e che influenzano l'effettiva distribuzione del flusso solare concentrato sul ricevitore. Essi sono riassumibili nei seguenti fattori principali:

- Le dimensioni finite del disco solare che sottende una regione di cielo di ampiezza angolare finita ed approssimativamente pari a  $0.5^\circ$  (4.65 mrad) e presenta una luminosità che è al centro più marcata che ai bordi (effetti della radiazione circumsolare). Le condizioni meteorologiche, l'inquinamento atmosferico e la presenza di particolato atmosferico, ne influenzano il profilo angolare che a sua volta influenza il comportamento ottico del sistema di concentrazione.
- Le superfici riflettenti del sistema parabolico non sono perfette poiché profilo, forma e contorni degli specchi deviano dalla idealità geometrica.
- L'allineamento e il posizionamento delle singole componenti ottiche del sistema di concentrazione non è perfetto e può essere realizzato solo entro certi limiti di tolleranza. Tali tolleranze si ripercuotono inevitabilmente sulla distribuzione di flusso radiativo sul ricevitore.
- L'inseguimento solare è soggetto ad errori di puntamento.

Altro parametro di primaria importanza nella messa a punto di una metodica, attendibile e riproducibile, per la misura sperimentale del flusso solare concentrato è rappresentata dal fatto che la suddetta misura, in condizioni reali di funzionamento del collettore, non può essere effettuata in corrispondenza della superficie esterna del tubo assorbitore. Ne consegue la necessità di caratterizzare la distribuzione del flusso solare concentrato a diverse distanze dal piano focale in modo da ricondurre i valori di potenza termica misurati ad una data distanza a quelli che effettivamente raggiungono la superficie esterna del tubo ricevitore.

Ciò premesso, l'approccio metodologico utilizzato è stato quello di:

1. analizzare come il livello di precisione costruttiva e gli effetti indotti dalle caratteristiche climatiche del sito, influenzino le prestazioni ottiche dell'intero sistema. Tale analisi è stata eseguita introducendo progressivamente le diverse sorgenti di errore che si traducono in un incremento della divergenza angolare da assegnare ai raggi solari incidenti sul sistema ottico di concentrazione, a parità di potenza per unità di superficie che raggiunge l'area di apertura del concentratore.  
Il risultato è una serie di profili di distribuzione del flusso solare concentrato, corrispondenti a diversi valori dell'errore ottico complessivo considerato, da confrontare con la mappatura sperimentale ottenuta con il dispositivo di misura al fine di verificare il livello di precisione del sistema ottico implementato nel componente in fase di analisi.
2. analizzare la variazione del flusso solare concentrato in funzione della distanza dal piano focale. Tale analisi è stata eseguita considerando delle superfici anulari di diametro via via crescente sulla cui superficie esterna è stata mappata la distribuzione del flusso solare concentrato. I valori così ottenuti sono stati confrontati con quelli relativi alla superficie esterna del ricevitore al fine di valutarne il decremento percentuale.  
Il risultato è una curva che esprime la variazione percentuale del flusso solare concentrato rispetto al target di riferimento. Tali valori percentuali consentono di ricondurre i valori di flusso misurati a quelli che effettivamente raggiungono il ricevitore.

Di seguito si riportano gli esiti delle valutazioni modellistiche eseguite sul sistema a concentrazione parabolico lineare considerato. I risultati ottenuti, pur riferendosi al caso di un sistema a concentrazione con ricevitore a geometria cilindrica, possono essere applicati con le dovute modifiche anche ad altre tipologie di concentratori caratterizzati da geometrie dell'ottica e del ricevitore differenti.

### 2.1.1 Analisi del flusso solare concentrato al variare della divergenza angolare del fascio solare

Le analisi ottiche sono state effettuate utilizzando tecniche di ray-tracing basate su metodo Montecarlo che, a partire da un dato valore di radianza sulla superficie di apertura del concentratore, hanno permesso di calcolare la distribuzione di radiazione concentrata sulla superficie del ricevitore.

Ai fini dell'analisi si è considerato un sistema di concentrazione caratterizzato da elementi ottici aventi forma geometrica e proprietà ottiche non ideali. In particolare sono stati tenuti in considerazione gli effetti dovuti:

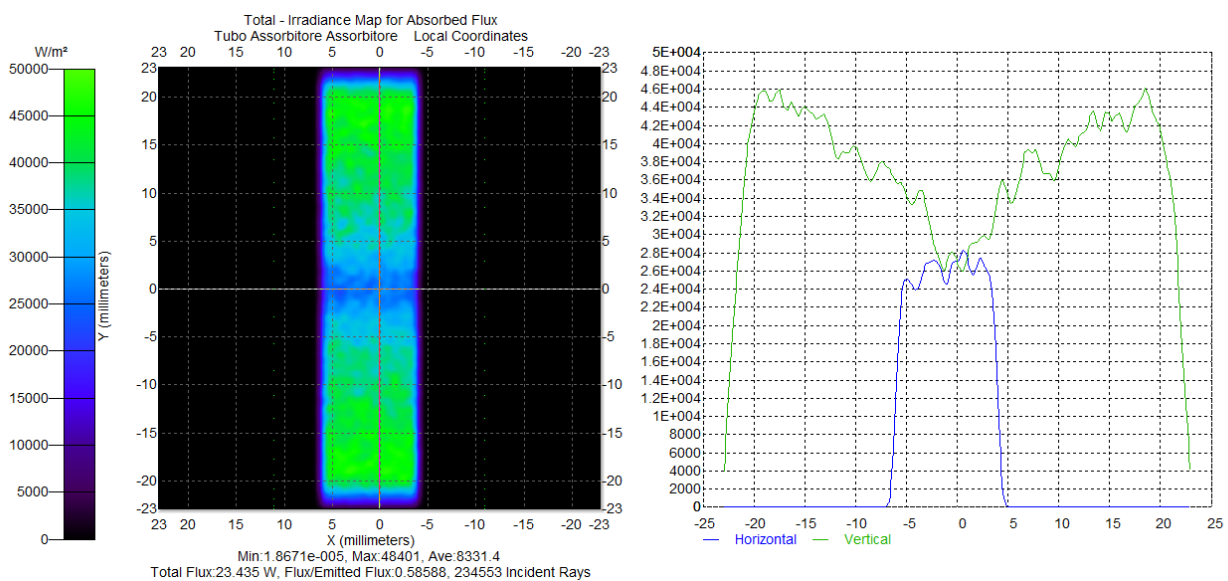
- alle imperfezioni costruttive e meccaniche degli specchi primari (deviazioni dalla forma ideale delle superfici riflettenti);
- agli errori di fissaggio meccanico e di posizionamento dei vari componenti ottici del sistema di concentrazione (deformazioni delle strutture di sostegno);
- agli errori di riflessione speculare dovuti alle imperfezioni delle superfici riflettenti;
- alla precisione del sistema di inseguimento (errori di tracking).

La tabella seguente riassume le condizioni di calcolo impostate per l'analisi ottica.

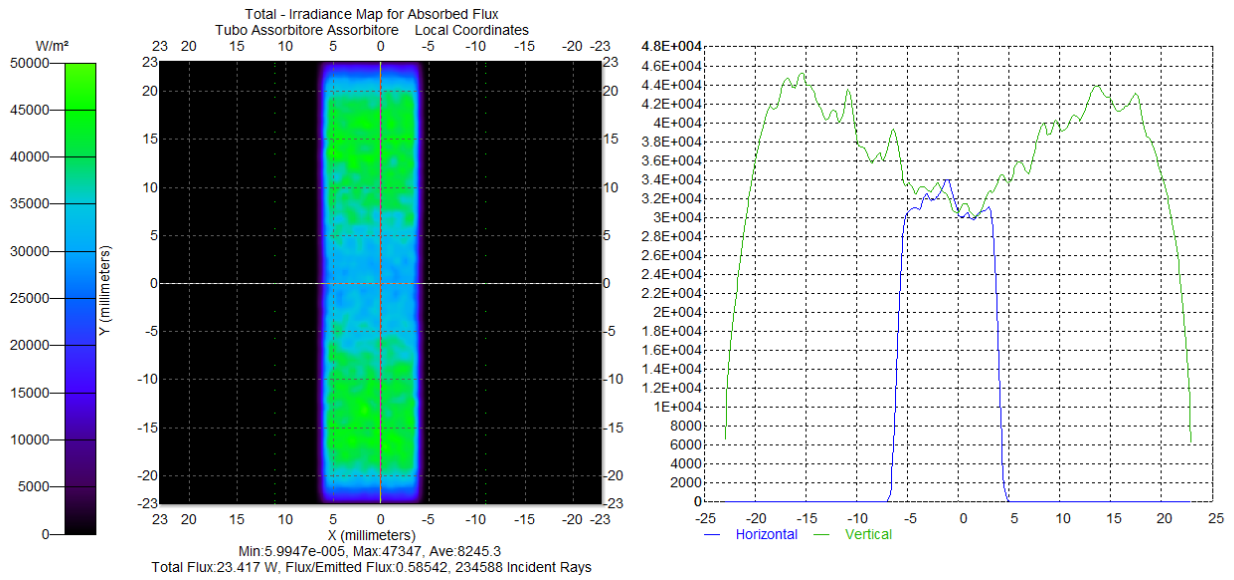
**Tabella 2 – Condizioni di calcolo adottate per l'analisi ottica**

Parametro	Valore
Irradianza solare (DNI)	1000 W/m <sup>2</sup>
Direzione del fascio di raggi solari	On-axis
Distribuzione angolare del flusso solare	Gaussiana
Divergenza angolare del fascio solare	Variabile: da 3 a 9 mrad
Riflettanza specchi primari	$\rho = 0.95$

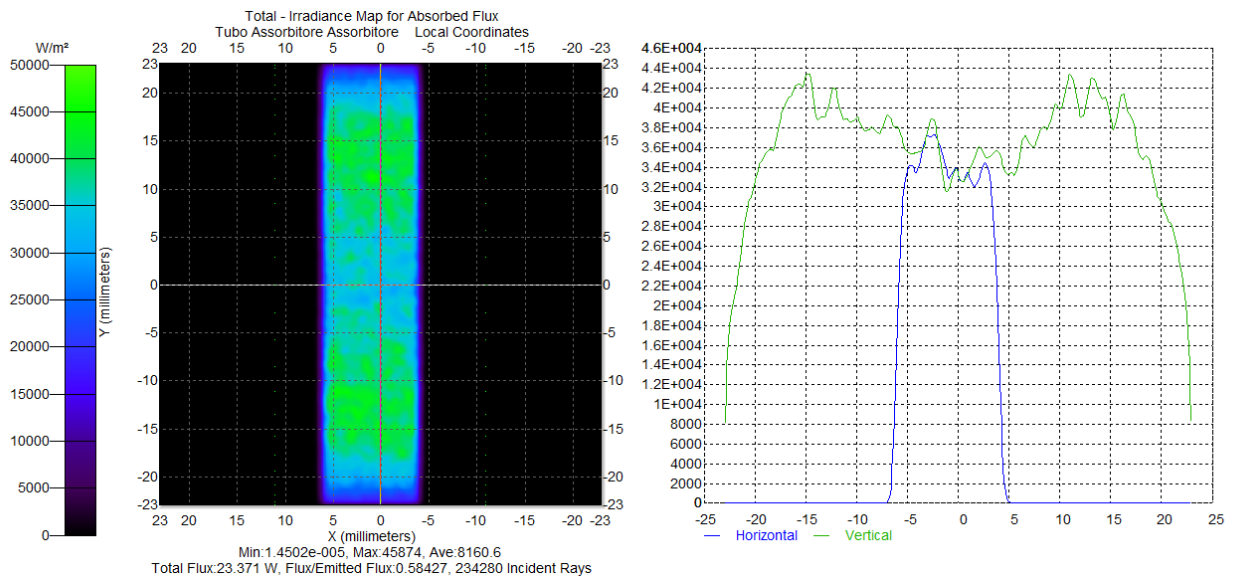
Le figure seguenti mostrano le distribuzioni di flusso solare concentrato su una porzione di tubo ricevitore di 10 mm di larghezza, ottenute considerando un errore ottico complessivo variabile da un minimo di 3 mrad fino ad un massimo di 9 mrad.



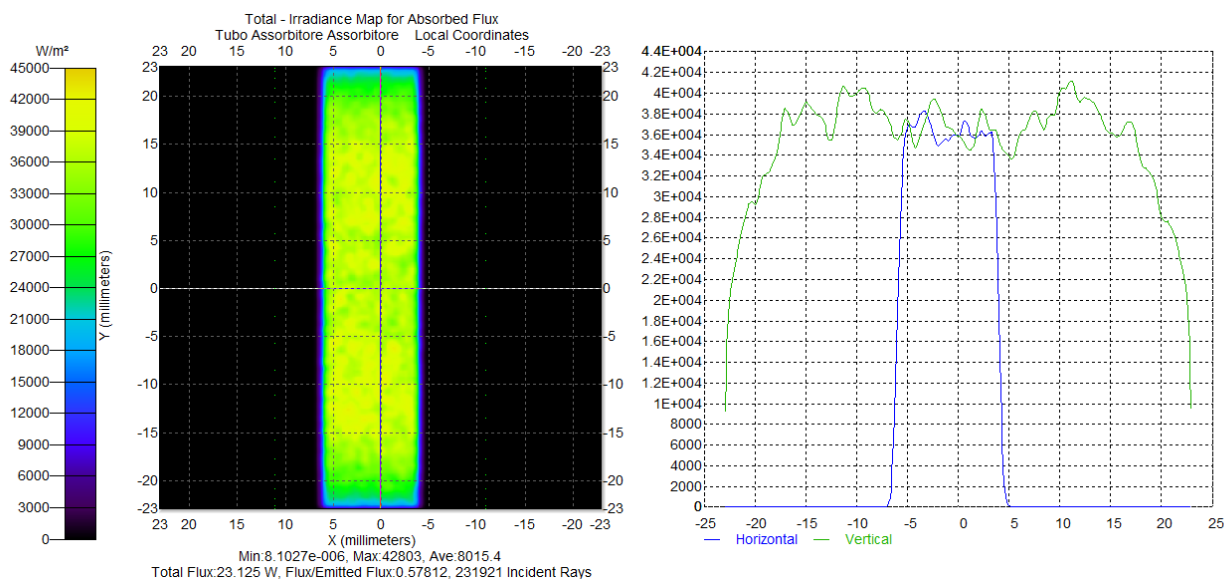
**Figura 2. Distribuzione del flusso solare concentrato su una porzione di tubo ricevitore di 10 mm , considerando un errore ottico complessivo di 3 mrad**



**Figura 3. Distribuzione del flusso solare concentrato su una porzione di tubo ricevitore di 10 mm , considerando un errore ottico complessivo di 5 mrad**

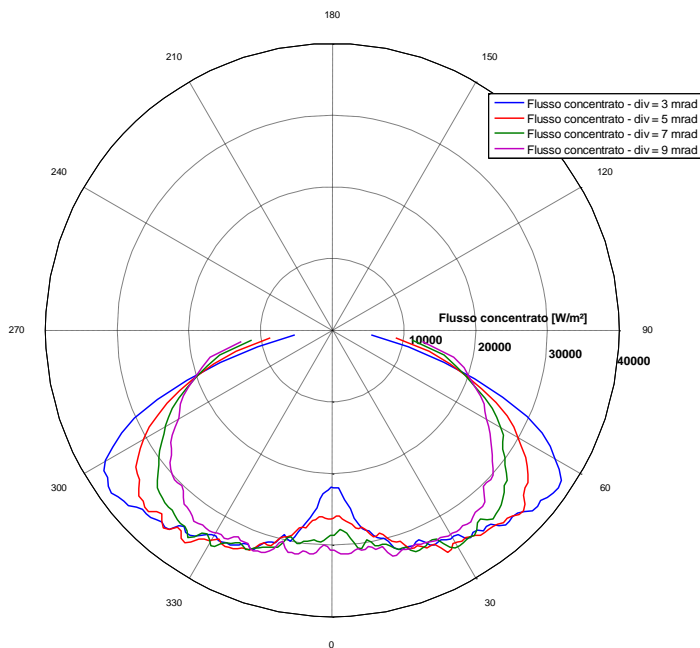


**Figura 4. Distribuzione del flusso solare concentrato su una porzione di tubo ricevitore di 10 mm , considerando un errore ottico complessivo di 7 mrad**



**Figura 5. Distribuzione del flusso solare concentrato su una porzione di tubo ricevitore di 10 mm , considerando un errore ottico complessivo di 9 mrad**

La figura seguente riassume su un diagramma polare l’esito delle valutazioni modellistiche eseguite a diversi valori della divergenza angolare assegnati ai raggi solari incidenti sul sistema ottico di concentrazione, a parità di potenza per unità di superficie che raggiunge l’area di apertura del concentratore. La figura evidenzia come si modificano i profili di distribuzione del flusso solare concentrato in funzione dell’errore ottico complessivo considerato, la cui forma può essere considerata una sorta di impronta che caratterizza la precisione costruttiva del sistema ottico di concentrazione.



**Figura 6. Diagramma polare delle distribuzioni del flusso solare concentrato sul tubo assorbitore, ottenute a diversi errori ottici**

### 2.1.2 Analisi del flusso solare concentrato al variare della distanza dal piano focale

Al fine di analizzare la variazione del flusso solare concentrato in funzione della distanza dal piano focale sono state effettuate delle simulazioni ottiche considerando delle superfici anulari, di larghezza pari a 10 mm e diametro esterno via via crescente da un minimo di 35 mm fino ad un massimo di 110 mm, sulla cui superficie esterna è stata mappata la distribuzione del flusso solare concentrato.

I grafici seguenti mostrano i risultati delle analisi effettuate, che si riferiscono ad una DNI di 1000 W/m<sup>2</sup> con distribuzione angolare dei raggi solari incidenti corrispondente ad una divergenza di 5 mrad.

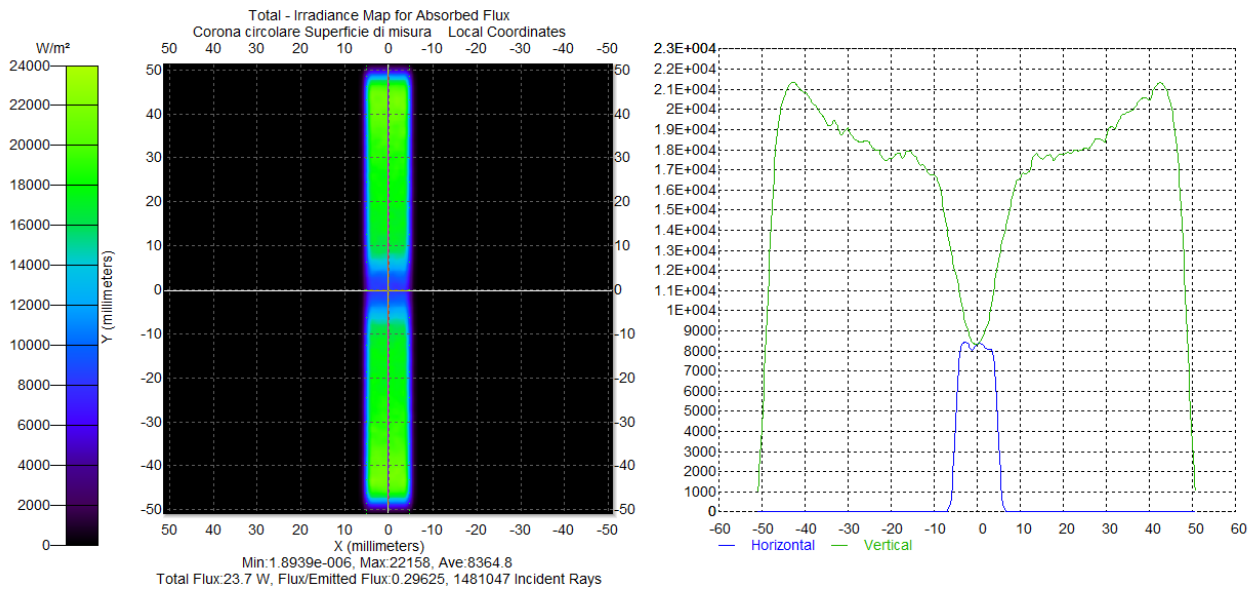


Figura 7. Analisi a 5 mrad e distanza R = 50 mm dal piano focale

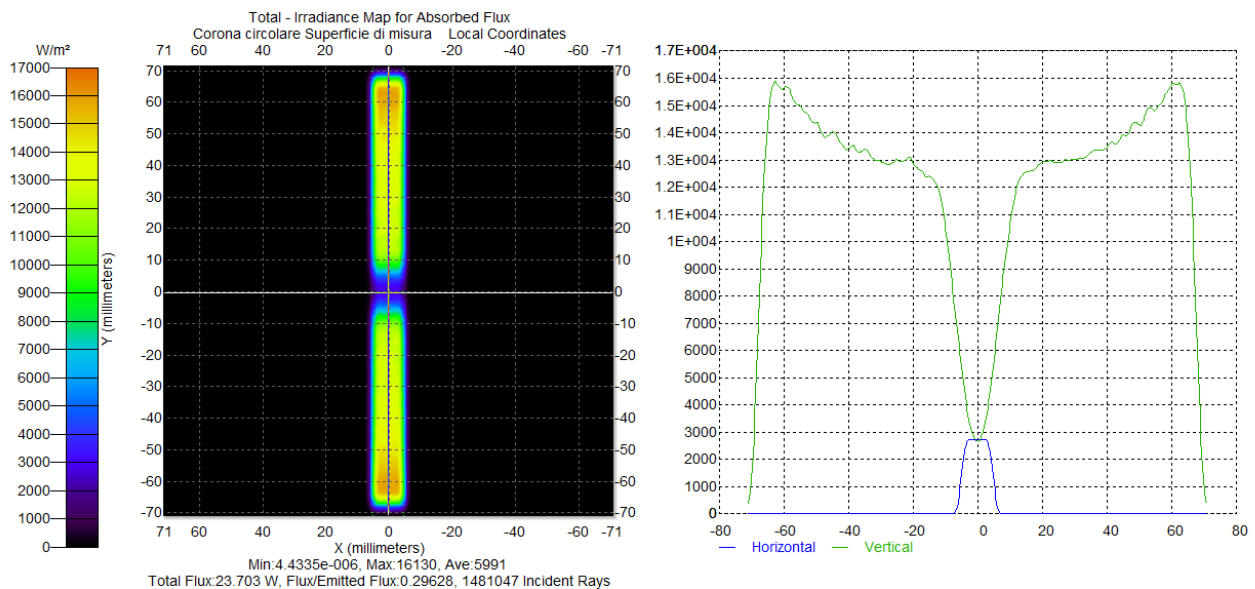


Figura 8. Analisi a 5 mrad e distanza R = 70 mm dal piano focale

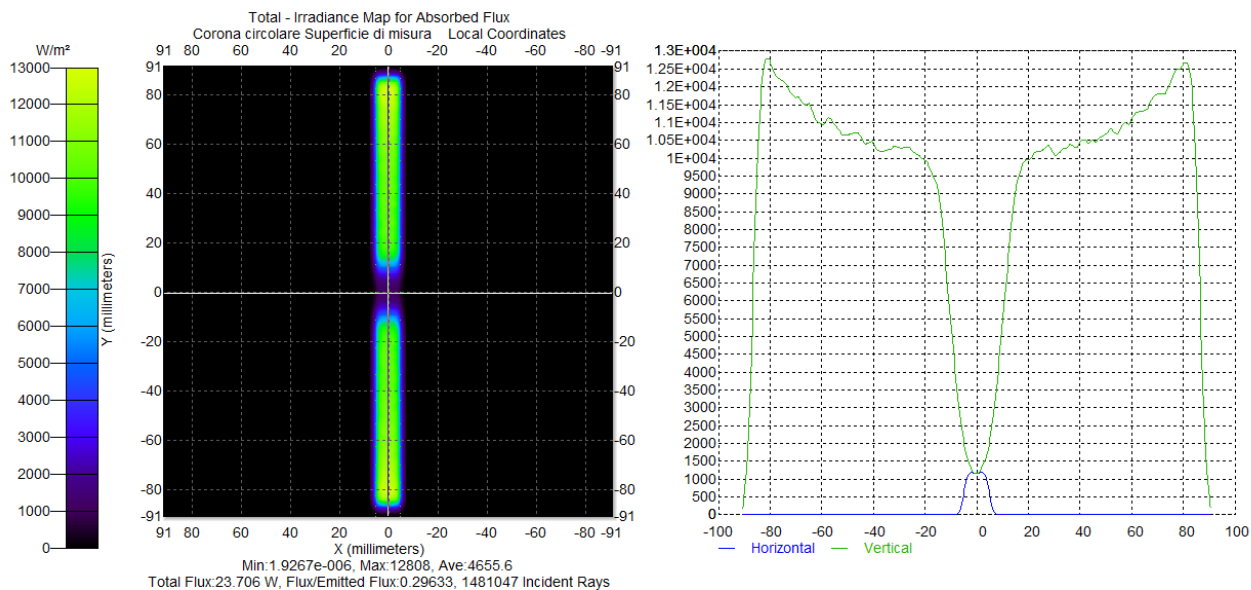


Figura 9. Analisi a 5 mrad e distanza R = 90 mm dal piano focale

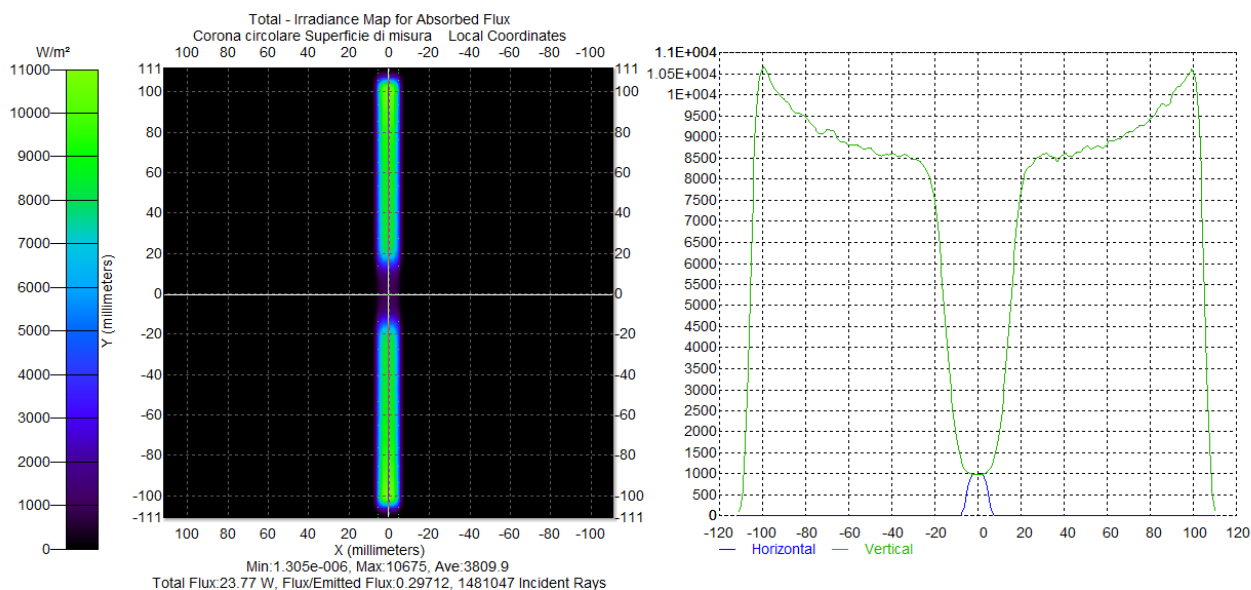
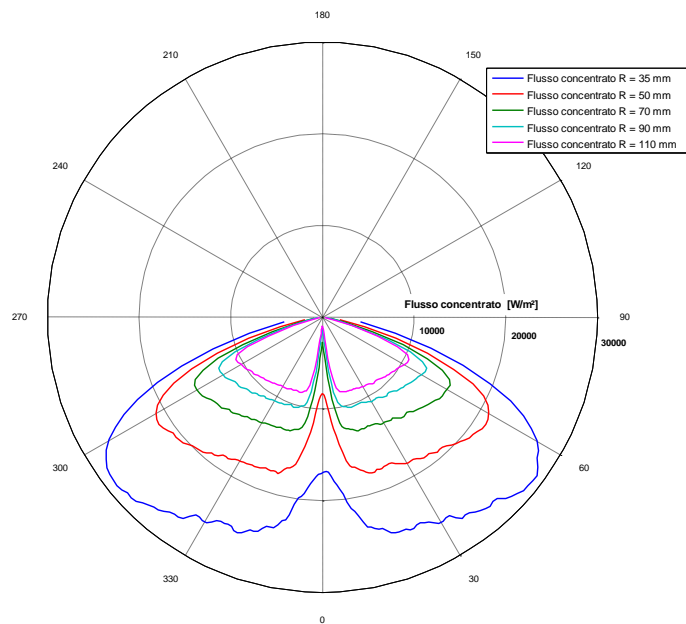


Figura 10. Analisi a 5 mrad e distanza R = 110 mm dal piano focale

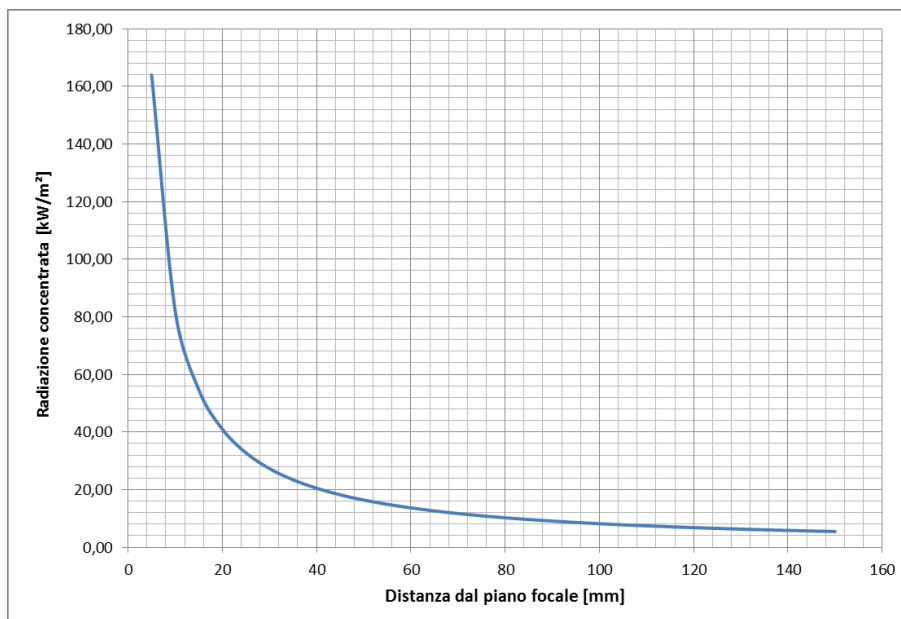
La figura seguente riassume su un diagramma polare l'esito delle valutazioni modellistiche eseguite a diverse distanze dal piano focale, a parità sia di potenza per unità di superficie che raggiunge l'area di apertura del concentratore sia di divergenza angolare assegnata ai raggi solari incidenti.

La figura evidenzia come i profili di distribuzione del flusso solare concentrato rimangano esattamente gli stessi al variare della distanza dal piano focale, a discapito però della potenza specifica che si riduce progressivamente in proporzione all'aumento della superficie esterna dell'anello considerato come target.



**Figura 11. Diagramma polare delle distribuzioni del flusso solare concentrato a distanze variabili dal piano focale**

Nel grafico seguente è invece riportata la variazione di flusso concentrato in funzione della distanza dal piano focale, a cui idealmente corrisponderebbe una concentrazione infinita in assenza di imperfezioni ottiche e con una sorgente di raggi solari a divergenza nulla. Essa è stata determinata a partire dai dati di flusso stimati con il software di ray-tracing, il cui andamento è esprimibile in prima approssimazione mediante la relazione  $P = P_0 L/x$ , dove  $P_0$  è il flusso medio incidente sul piano di apertura (pari a  $1000 \text{ W/m}^2$ ),  $L$  è la distanza focale ed  $x$  è la coordinata che rappresenta la distanza dal piano focale nella direzione dell'asse ottico della sistema parabolico lineare. Dal grafico emerge subito che le variazioni più consistenti si hanno nei primi 20 mm di distanziamento dal piano focale ideale.



**Figura 12. Andamento del flusso solare concentrato in funzione della distanza dal piano focale.**

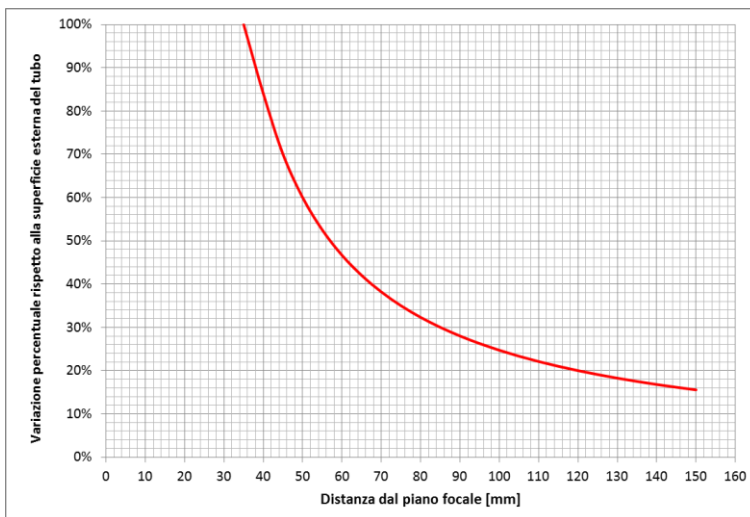
La figura seguente mostra infine le variazioni percentuali del flusso solare concentrato rispetto al target di riferimento, rappresentato dalla superficie esterna del tubo assorbitore (posto a circa 21 mm dal piano focale).

Si fa notare come già ad una distanza di 35 mm dal piano focale (corrispondente alla superficie esterna del tubo di copertura in vetro) il flusso si riduca al 60% del valore che raggiunge il target (tubo assorbitore).

I risultati di tale analisi sono di primaria importanza per la valutazione in campo del flusso solare concentrato in ricevitori a geometria cilindrica, per i quali non è possibile effettuare misure dirette nella regione di concentrazione effettiva.

**Tabella 3 – Variazione percentuale del flusso solare concentrato rispetto al target considerato (tubo ricevitore)**

<i>Distanza dal piano focale [mm]</i>	<i>Variazione [%]</i>
21	100.0
35	60.0
50	42.0
70	30.0
90	23.3
110	19.1



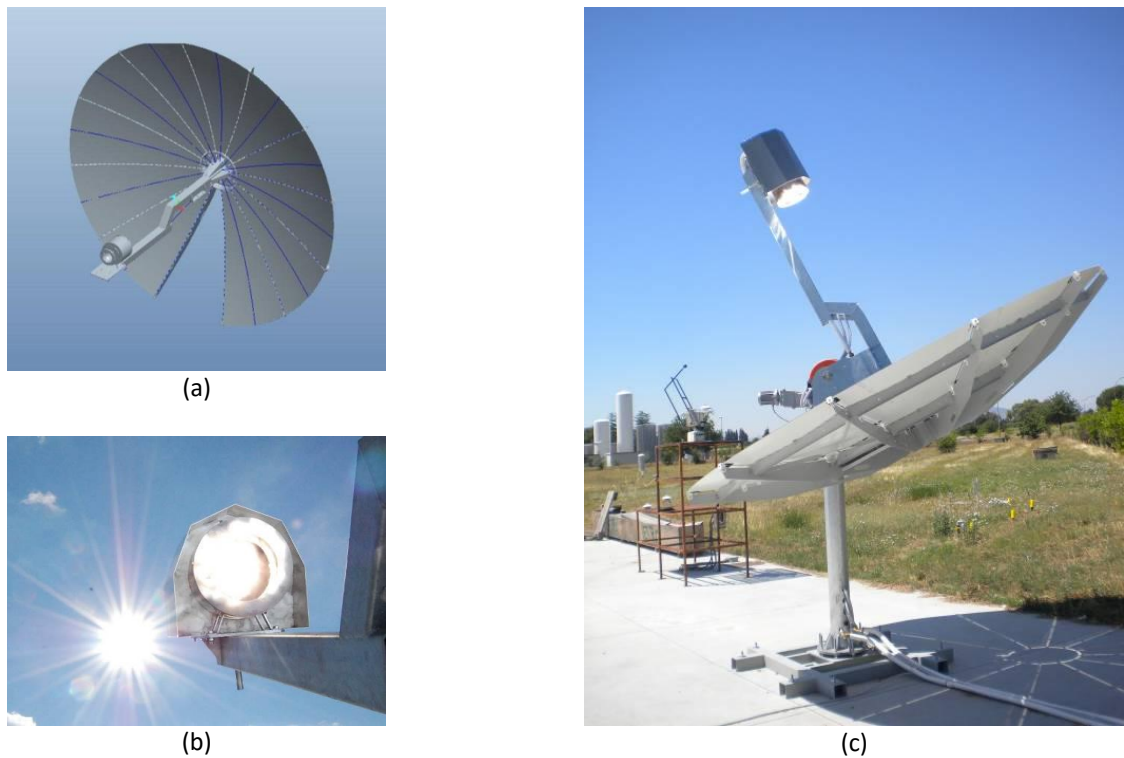
**Figura 13: Variazione percentuale del flusso solare concentrato rispetto al valore misurato sulla superficie esterna del ricevitore.**

## 2.2 Verifica della metodica di misura mediante prove sperimentali preliminari su un sistema del tipo Point-Focusing

Al fine di testare preliminarmente la metodica di misura descritta al paragrafo precedente, sono state condotte delle prove sperimentali su un sistema del tipo Point-Focusing (ossia sistemi a disco di piccole dimensioni per applicazioni solo termiche o ibride, quali i sistemi Dish/Stirling) i cui esiti hanno permesso di verificare la bontà delle scelte operate.

La figura seguente mostra il componente utilizzato per le suddette prove preliminari, costituito da un sistema Dish/Stirling operante in assetto cogenerativo con potenze di picco pari a 1 kW elettrico e 3 kW termici con temperature massime del fluido in uscita dell'ordine di circa 60-70°C.





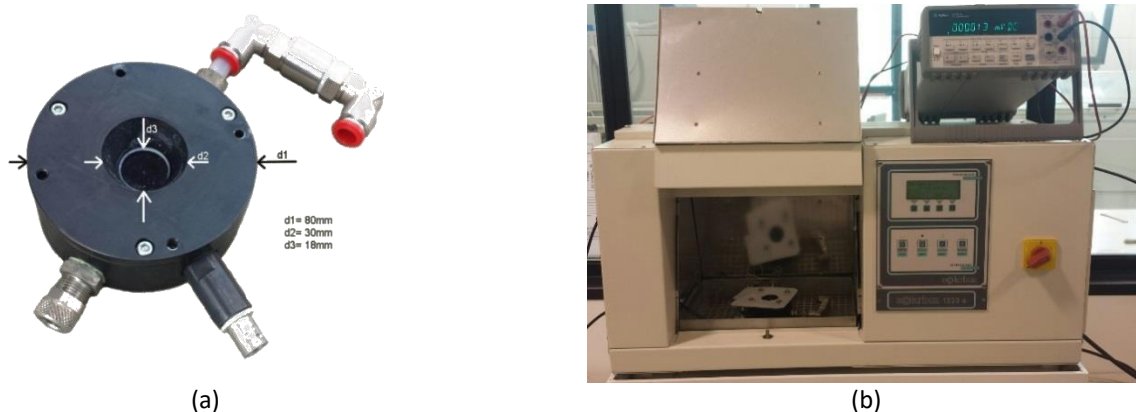
**Figura 14:** a) Schema del sistema ottico di concentrazione; b) Dettaglio del ricevitore Stirling durante la fase di prova; c) Foto del sistema Dish/Stirling durante le fasi di misura

### 2.2.1 Apparato sperimentale e relativa caratterizzazione

Per la valutazione della distribuzione di flusso concentrato, è stato messo a punto un apparato sperimentale prototipale, basato su un sensore a termopila, in grado di misurare gli elevati flussi di radiazione ottenibili in concentratori parabolici puntuali, quali i sistemi Dish/Stirling, nei quali è possibile raggiungere flussi sul fuoco dell'ordine di alcune centinaia di kW per m<sup>2</sup>.

In particolare, è stato utilizzato un sensore della OPHIR - mod. 1000W-BB - raffreddato ad acqua e tipicamente utilizzato in applicazioni laser per la misura della potenza termica in un range compreso tra 5W a 1000W, con densità di flusso massime rilevabili pari a circa 6 kW/cm<sup>2</sup>.

Tale sensore è stato dapprima caratterizzato in laboratorio (vedi figura seguente), mediante l'utilizzo di una SolarBox, per determinarne la curva di calibrazione necessaria a stimare il flusso concentrato a partire dalla misura della tensione generata dalla termopila.

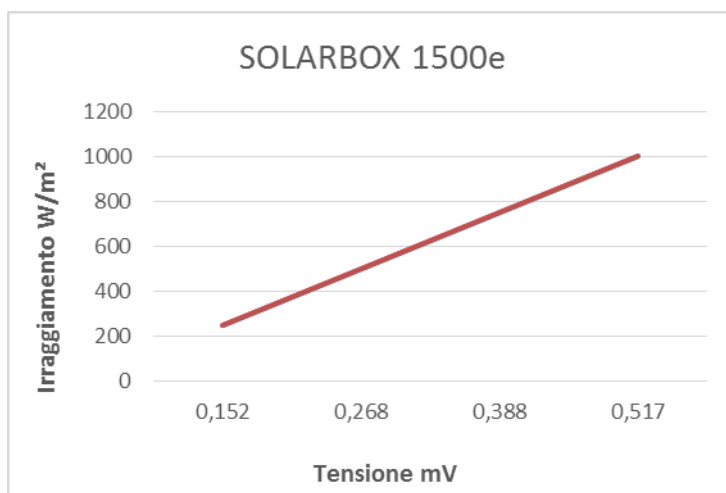


**Figura 15:** a) Sensore a termopila utilizzato nella fase preliminare di messa a punto della metodica di misura della radiazione concentrata; b) Caratterizzazione del sensore a termopila mediante misure di tensione effettuate in corrispondenza di flussi di radiazione crescenti e generati mediante una SolarBox.

La figura seguente riporta la tabella con i dati rilevati durante la fase di calibrazione e la relativa curva di taratura ottenuta.

**Tabella xx - Dati misurati durante la fase di calibrazione**

<i>Irraggiamento [W/m<sup>2</sup>]</i>	<i>Tensione [mV]</i>
250	0.152
500	0.268
750	0.388
1000	0.517

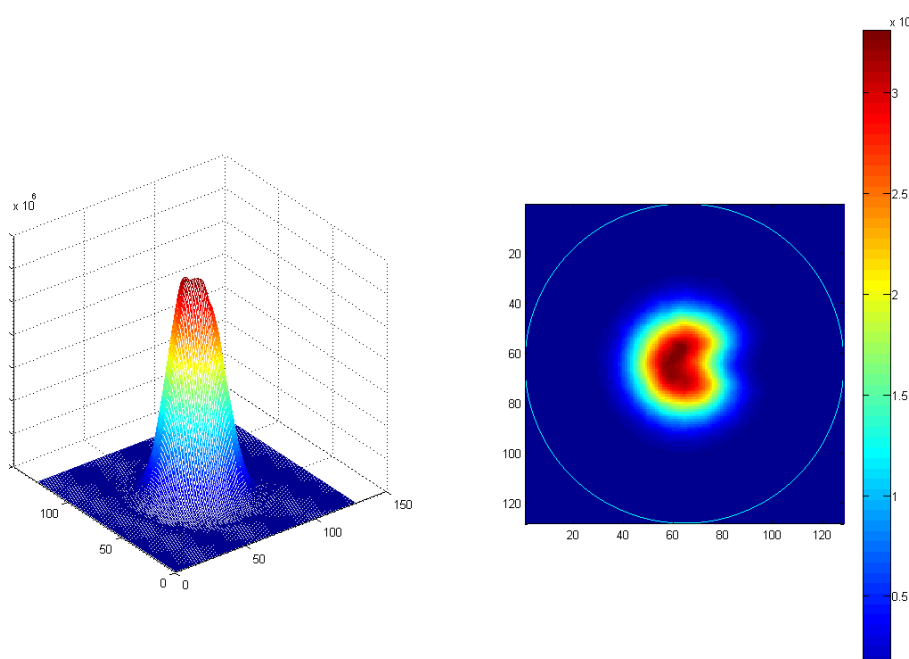


**Figura 16: Tabella dati e grafico con curva di calibrazione ottenuta con al SolarBox.**

Tale curva di calibrazione stimata in laboratorio è stata poi utilizzata per determinare il flusso solare concentrato durante una serie di prove preliminari condotte sul ricevitore del sistema Dish/Stirling che è stato equipaggiato con una guida graduata (posta ad una distanza di 30 cm dal piano focale) su cui è stato fatto scorrere il sensore di misura.

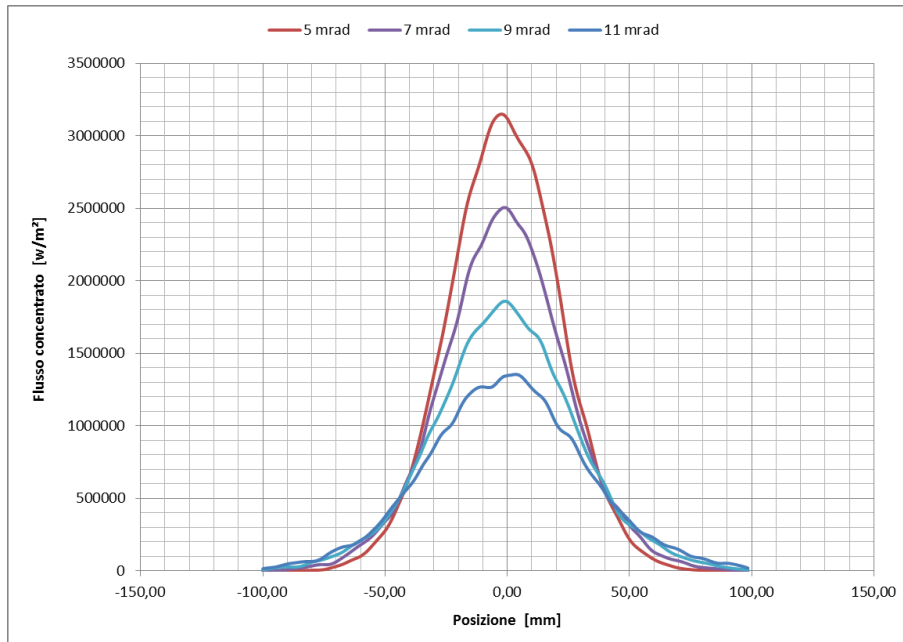
### 2.2.2 Analisi ottiche preliminari

In accordo con la metodica descritta al paragrafo precedente, sono state condotte delle simulazioni ottiche tese a determinare sia i diversi profili di distribuzione del flusso solare concentrato al variare della divergenza del fascio solare incidente sia le variazioni percentuali del flusso solare concentrato al variare della distanza del target dal piano focale di riferimento.



**Figura 17: Distribuzione del flusso solare concentrato sul target (corrispondente al foro di ingresso del ricevitore Stirling) posto a 20 cm dal piano focale.**

La figura seguente riassume gli esiti delle valutazioni effettuate su una sezione trasversale del ricevitore. I profili di distribuzione del flusso solare concentrato ottenuti si riferiscono ad una DNI di 1000 W/m<sup>2</sup> con una divergenza nella distribuzione angolare dei raggi solari incidenti variabile da un minimo di 5 mrad fino ad un massimo di 11 mrad.



**Figura 18: Confronto tra i profili di distribuzione del flusso solare concentrato su un sezione del ricevitore, valutate per diversi valori di allargamento angolare del fascio solare incidente.**

Nel grafico seguente è invece riportata la variazione di flusso concentrato in funzione della distanza dal piano focale, a cui idealmente corrisponderebbe una concentrazione infinita in assenza di imperfezioni ottiche e con una sorgente di raggi solari a divergenza nulla. Essa è stata determinata in prima approssimazione mediante la relazione seguente, che lega il flusso medio ad una qualsiasi distanza intermedia tra il piano focale e il piano di apertura del sistema ottico primario:

$$P = P_0 \left( \frac{L}{x} \right)^2$$

dove  $P_0$  è il flusso incidente sul piano di apertura (nel nostro caso 815 W/m<sup>2</sup>),  $L$  è la distanza focale e  $x$  è la coordinata che rappresenta la distanza dal piano focale nella direzione dell'asse del paraboloide. Dal grafico emerge subito che le variazioni più consistenti si hanno nei primi 20-30 cm di distanziamento dal piano focale ideale.

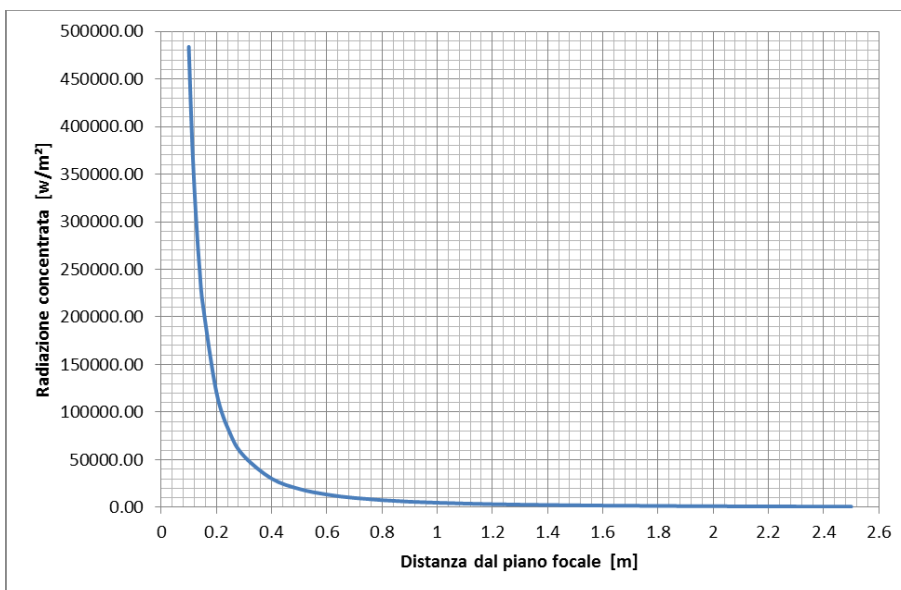


Figura 19: Andamento della radiazione concentrata in funzione della distanza dal piano focale.

Il grafico seguente mostra invece la variazione percentuale del flusso concentrato rispetto al valore misurato in corrispondenza del target posto a 20 cm dal piano focale. Dal grafico si evidenzia che per una misura sperimentale eseguita a 30 cm dal piano focale (ossia a +10 cm dal target) il flusso concentrato si riduce del 44.4%.

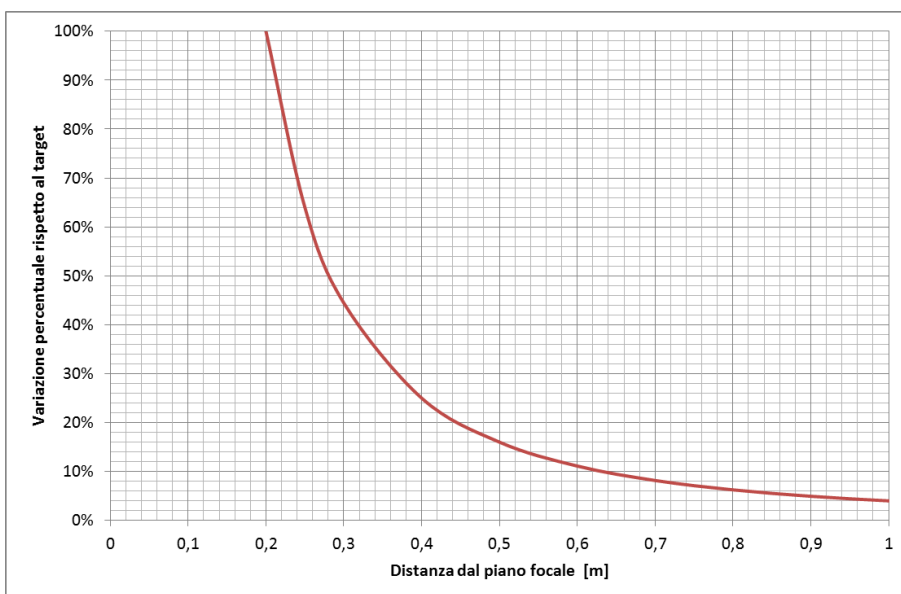


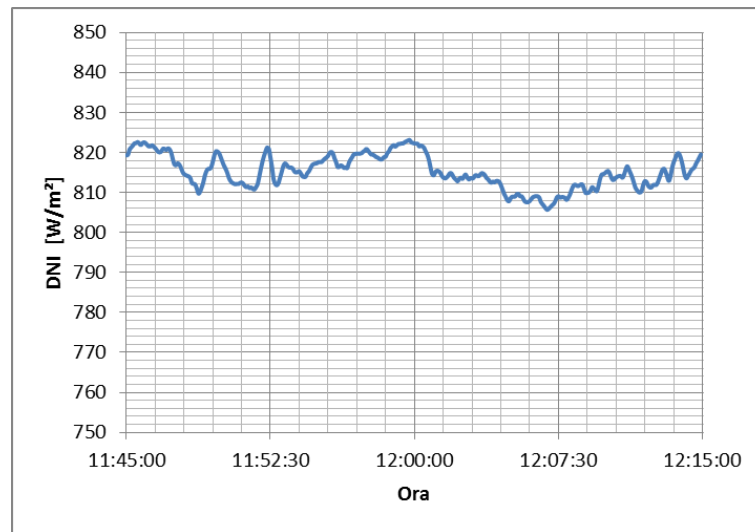
Figura 20: Variazione percentuale del flusso solare concentrato rispetto al valore misurato sul target posto a 20 cm dal piano focale.

### 2.2.3 Risultati delle prove sperimentali

I risultati di seguito illustrati si riferiscono a misure effettuate attorno al mezzogiorno solare, in condizioni di cielo terso ed ad una temperatura ambiente di circa 17°C.

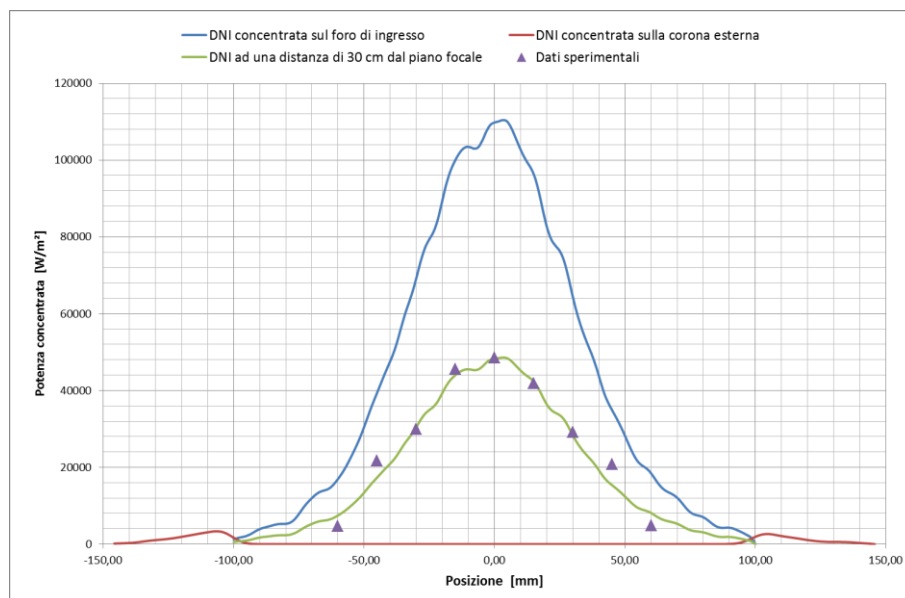
Il grafico seguente illustra l'andamento della radiazione solare diretta (DNI) durante i 30 minuti di prove eseguite per la caratterizzazione del profilo di radiazione concentrata. Durante tale periodo di prova la DNI

si è mantenuta costante attorno al valore medio di  $815 \text{ W/m}^2$  con fluttuazioni di ampiezza massima di  $\pm 10 \text{ W/m}^2$ .



**Figura 21: DNI incidente sull'area di apertura del sistema Dish/Stirling**

La figura seguente mostra i risultati delle prove preliminari eseguite sul sistema Dish/Stirling, mettendo a confronto i dati sperimentali ottenuti con il sistema di misura descritto precedentemente e la distribuzione attesa del flusso solare concentrato sul ricevitore in corrispondenza piano effettivo di misura (posto a 30 cm dal piano focale e a +10 cm dal target).



**Figura 22: Confronto tra la distribuzione attesa del flusso solare concentrato sul ricevitore e i dati sperimentali ottenuti.**

In particolare nel grafico precedente sono evidenziati:

- l'andamento della radiazione solare concentrata (curva di colore blu) su una sezione orizzontale del ricevitore Stirling in corrispondenza sul foro di apertura, così come ottenuta a seguito delle simulazioni ottiche eseguite con il software di ray-tracing TRACEPRO, in corrispondenza delle condizioni effettive di funzionamento nel giorno delle misure, ossia:  $\text{DNI}=815 \text{ W/m}^2$  e divergenza angolare del fascio solare di

11 mrad (corrispondente all'allargamento stimato del fascio solare in conseguenza delle imperfezioni del sistema ottico utilizzato);

- la distribuzione teorica del flusso solare concentrato sulla corona esterna del ricevitore (curva di colore rosso);
- poiché non è stato possibile, a causa degli ingombri del dispositivo di misura, effettuare le rilevazioni sperimentali in corrispondenza del target considerato per le analisi teoriche (corrispondente alla posizione del foro di ingresso del ricevitore Stirling posto ad una distanza di 20 cm dal piano focale), i valori di radiazione concentrata (curva di colore verde) sono stati ricalcolati in corrispondenza del piano di misura effettivo (posto a 30 cm dal piano focale a + 10 cm dal target) per tener conto della riduzione stimata del 44.4% del flusso solare;
- i punti di colore viola corrispondono ai dati sperimentali, ottenuti mediante 9 rilevazioni simmetriche rispetto al centro del ricevitore ed equi-spaziate di circa 15 mm l'una dall'altra.

Dal confronto tra i dati ottenuti mediante le simulazioni ottiche e i dati sperimentali rilevati durante la giornata di prova, emerge un ottimale accordo a favore della validità dell'approccio sperimentale adottato che ha permesso di mettere a punto una tecnica che consente di misurare la radiazione solare concentrata sul ricevitore di un sistema del tipo Dish/Stirling di piccola taglia. Tale tecnica ha permesso di verificare, nei limiti delle approssimazioni del metodo di test utilizzato, che le assunzioni effettuate per via teorica sulla distribuzione di flusso concentrato si sono rivelate molto vicine al caso reale, confermando le stime modellistiche della producibilità elettrica e termica per tale tipologia di sistemi cogenerativi destinati ad applicazioni distribuite di piccola taglia per il settore residenziale.

### *2.3 Messa a punto di un radiometro totalmente automatizzato per la misura della radiazione concentrata su sistemi parabolici lineari con ricevitore a geometria cilindrica*

In continuità con l'attività svolta nella precedente annualità, presso il Laboratorio solare del *Centro Ricerche ENEA di Trisaia*, è stato messo a punto un dispositivo totalmente automatizzato per la misura della distribuzione angolare e longitudinale della radiazione solare concentrata sul tubo ricevitore di un collettore parabolico lineare per applicazioni a media temperatura.

Di seguito si riportano le principali caratteristiche del dispositivo:

- struttura portante realizzata in lega leggera costituita da diversi sottosistemi elettro-meccanici necessari per il montaggio e la movimentazione del dispositivo quali: il sistema di serraggio autocentrante per l'adattamento ai diversi diametri del tubo ricevitore; il sistema di trasmissione del moto lineare ed il sistema di rotazione del sensore;
- azionamenti di precisione realizzati con riduttori epicicloidali del tipo a stepper;
- interfaccia hardware, realizzata su piattaforma Arduino con interfaccia Xbee per la trasmissione a distanza, utilizzata per l'acquisizione dei segnali provenienti dal sensore HFM per la misura della radiazione solare concentrata e per il controllo degli azionamenti da trasmettere via *wi-fi* ad un computer remoto;
- controllore logico con relativo firmware *customizzato* installato a bordo del dispositivo;
- sistema di alimentazione a batteria con relativo circuito di ricarica;
- software dedicato per la gestione remota del dispositivo che consente, attraverso un PC portatile, il controllo completo di tutte le fasi operative del dispositivo.

La figura seguente mostra il sistema nel suo complesso con alcuni dettagli relativi alle meccaniche di precisione messe a punto per garantire i movimenti rotazionali e traslatori con le precisioni richieste (posizionamento angolare con precisione inferiore ad 1/10 di grado e velocità di rotazione dell'ordine di 1 rad/sec; posizionamento longitudinale con precisione inferiore ad 1 mm e spostamenti programmabili).

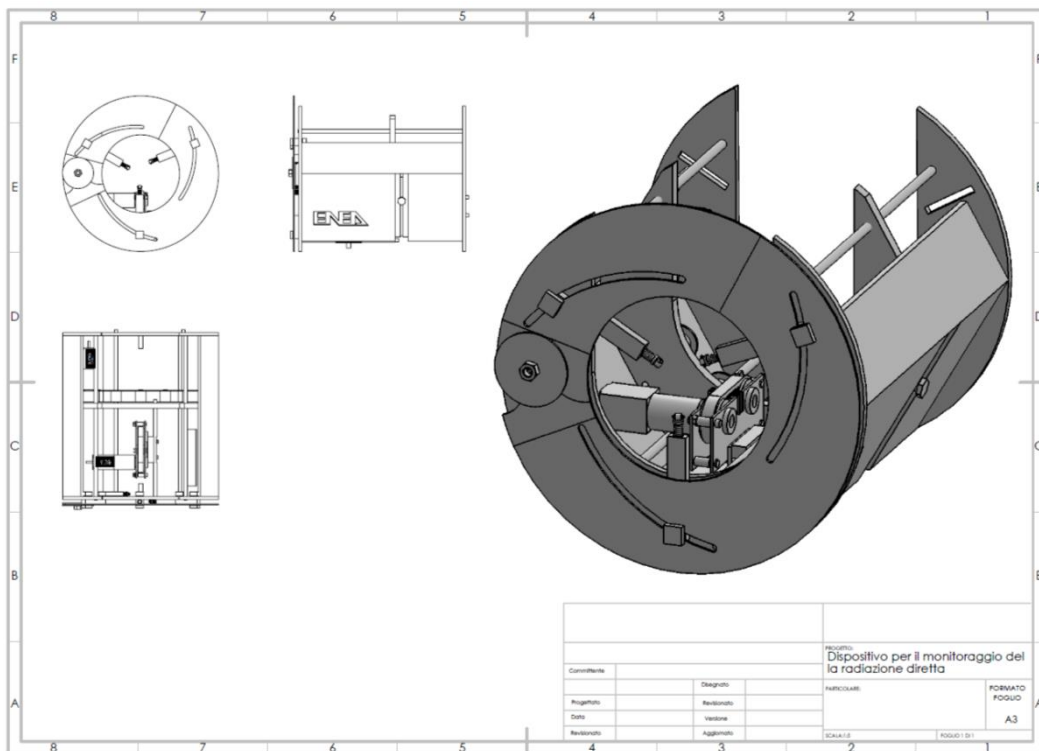


Figura 23: Vista assonometrica del dispositivo di misura e relative viste in pianta e sezione

Il dispositivo è infine equipaggiato con un micro-sensore VateLL HFM-7E/L con sonda RTD per la misura del flusso solare concentrato, le cui principali caratteristiche sono riportate nella figura seguente.



Caratteristiche principali del **sensore HFM** (Heat Flux Microsensor) per la misura del flusso termico:

- Tempo di risposta: 17  $\mu$ s
- Sensibilità minima: 150  $\mu$ V/(W/cm<sup>2</sup>)
- Massima temperatura superficiale: 350 °C
- Materiale sensore: nichel-cromo/costantana
- Misura della temperatura superficiale: mediante RTD integrata
- Accuratezza:  $\pm$ 3%
- Ripetibilità: 2%
- Cassa di contenimento del sensore: rame / ottone
- Cavo: con rivestimento in Teflon per alte temperature

Figura 24: Sensore di flusso termico VateLL HFM-7E/L con sonda RTD per la misura della temperatura superficiale

Nello specifico il dispositivo di misura è un radiometro con tecnologia MDF (mappatura diretta del flusso di calore) che utilizza un sensore del tipo HFM (*Heat Flux Micro-sensors*). Il dispositivo di cui sopra ha il compito di monitorare ed acquisire la radiazione solare concentrata che direttamente raggiunge la

superficie del ricevitore solare. Il radiometro è in grado di mappare la distribuzione di flusso mediante un micro-sensore per la misura del flusso termico che scannerizza angolarmente e longitudinalmente una definita porzione di tubo assorbitore; nello specifico una serie di semi-corone circolari che si estendono per un angolo massimo di 180° lungo una porzione definita di tubo ricevitore. In particolare, per eseguire la scansione, il dispositivo esegue dapprima un movimento circolare e successivamente un movimento di traslazione longitudinale lungo l'asse del tubo. L'acquisizione avviene simultaneamente al movimento di rotazione e solo dopo che è stata mappata tutta la semi corona circolare del tubo ricevitore esposta alla radiazione solare concentrata, il dispositivo esegue il movimento di traslazione che avviene per step di lunghezza variabile e definita dal sistema di programmazione e controllo. Fatto ciò, il dispositivo riprende nuovamente l'acquisizione durante il successivo movimento di rotazione su una nuova sezione di semi corona circolare del tubo ricevitore. Un'opportuna elettronica di bordo gestisce le varie fasi di movimentazione ed acquisizione dei dati di flusso solare concentrato. Un sistema di comunicazione wi-fi invia in tempo reale tutte le informazioni ad un sistema di acquisizione remoto. La programmazione relativa alle diverse fasi di acquisizione e gestione della movimentazione del dispositivo può essere eseguita sia da un'interfaccia remota collegata al dispositivo mediante il segnale wi-fi oppure direttamente a bordo macchina.

### 2.3.1 Ingegnerizzazione del dispositivo

La fase di ingegnerizzazione e progettazione del dispositivo si è suddivisa nelle seguenti 4 macro fasi:

- **Fase 1:** dimensionamento del sistema di supporto e del sistema di movimentazione ed ancoraggio, scelta dei materiali per la realizzazione della struttura metallica;
- **Fase 2:** dimensionamento elettro-meccanico e scelta degli attuatori e del sensore di misura;
- **Fase 3:** dimensionamento dell'elettronica di controllo e del sistema di alimentazione;
- **Fase 4:** progettazione del software di acquisizione dati dedicato per la gestione remota del dispositivo che consente, attraverso un PC portatile, il controllo completo di tutte le fasi operative del dispositivo.

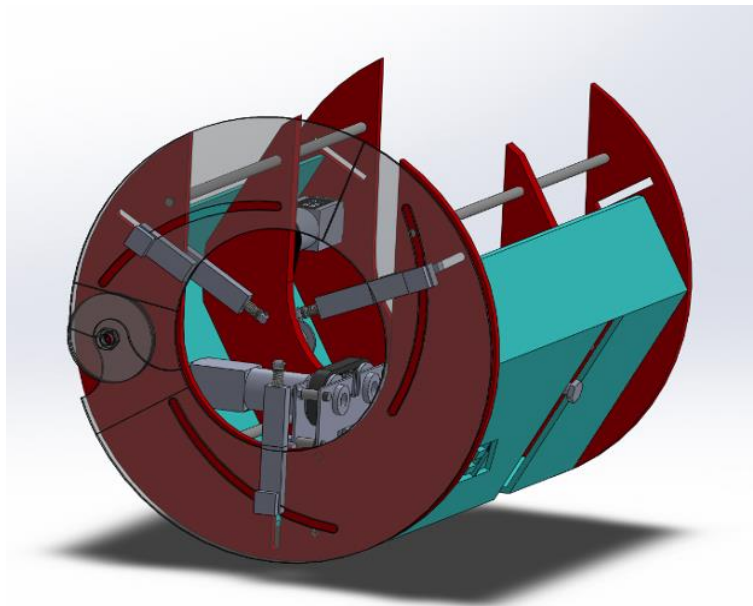
#### **Fase 1**

Tale fase ha riguardato il dimensionamento del sistema di supporto ed ancoraggio del radiometro al tubo ricevitore. In particolare è stata ideata ed ingegnerizzata la struttura metallica di ancoraggio e supporto in grado di garantire l'adattabilità del dispositivo a diametri differenti del tubo ricevitore, variabili da un minimo di 70 mm fino ad un massimo di 150 mm.

La parte strutturale è costituita essenzialmente da due collari collegati rigidamente tra loro mediante assi metallici. I collari a loro volta sono costituiti da 2 pezzi: il primo, di dimensioni maggiori, è stato dimensionato prevedendo che la corona circolare fosse sezionata al suo interno realizzando una luce pari a 150 mm e tale da permettere il passaggio della tubo ricevitore con diametro massimo; il secondo pezzo di collare permette la completa chiusura della corona circolare mediante una clip magnetica.

Su tali corone sono state realizzate delle asole con profilo evolvente, al cui interno scorrono gli ancoraggi di 3 perni autocentranti sfasati angolarmente di 120°. I perni sono dotati di un sistema di serraggio mediante vite senza fine e nella zona di contatto con il tubo sono muniti di un sistema elastico dotato di molle e ruote, tali da garantire che il dispositivo si mantenga solidale con il tubo ricevitore, senza che si verifichino fenomeni di torsione e disassamento.





**Figura 25: Immagine del dispositivo nel suo complesso**

Tutti i componenti costituenti le corone circolari, gli assi di connessione e la schermatura metallica sono stati dimensionati prevedendo l'uso di materiali metallici altamente resistenti e con sezioni tali da rendere il peso globale del radiometro entro i 4 kg. A tal fine è stato utilizzato l'acciaio AISI 304 per tutte le parti di schermatura mentre si è ricorso all'alluminio per le parti relative alle corone di aggancio, ai perni di regolazione e agli assi di collegamento.

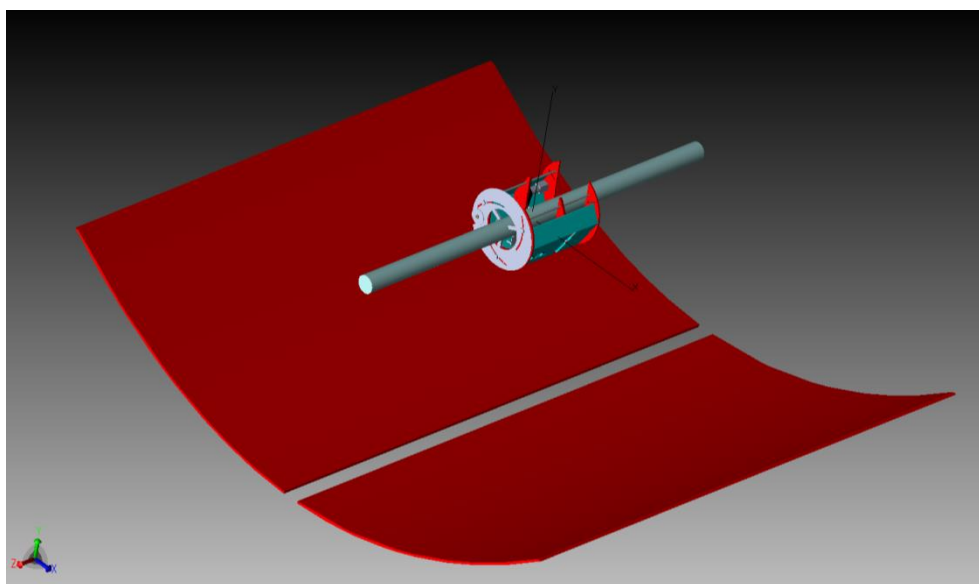
Per garantire il corretto funzionamento del dispositivo è stata eseguita un'attenta valutazione della distribuzione dei pesi, in maniera tale da garantire che il baricentro del dispositivo cadesse nell'asse mediano del tubo ricevitore, assicurando che non si inneschino disallineamenti del sensore tali da influenzare la misura durante l'acquisizione dei dati.

A causa dell'elevata esposizione ad alti flussi termici dovuti alla radiazione concentrata, tutte le scatole metalliche contenenti sia le schede elettroniche che il sistema di alimentazione a batteria sono state dotate di feritoie per permettere un continuo flusso di aria in grado di smaltire il calore accumulato. Qualora però il dispositivo raggiungesse temperature ritenute critiche per la parte elettromeccanica, un sensore, montato all'interno del radiometro e deputato al monitoraggio continuo della temperatura dello chassis, invierà un segnale di "warning" alla centralina di controllo che immediatamente riporterà il radiometro fuori fuoco limitando l'esposizione alla radiazione solare.

Al fine di valutare preliminarmente i possibili effetti termici indotti dall'esposizione prolungata ad alti flussi di radiazione solare concentrata, sono state eseguite delle valutazioni ottiche preliminari che hanno consentito di valutare le potenze termiche che potenzialmente possono raggiungere il carter di protezione predisposto a protezione degli apparati elettro-meccanici ed elettronici posizionati a bordo strumento.

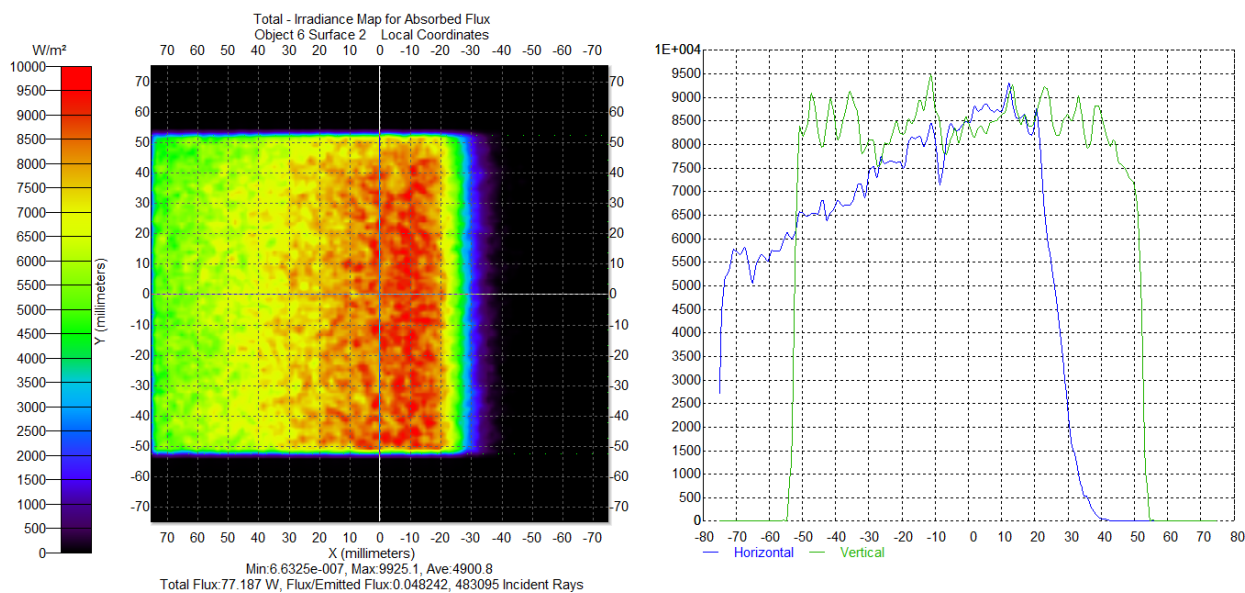
In particolare sono state effettuate analisi ottiche con tecniche di ray-tracing considerando le condizioni operative più gravose, corrispondenti ad una DNI incidente sul piano di apertura del concentratore di 1000 W/m<sup>2</sup>.

La figura seguente mostra il modello CAD implementato sia per il sistema ottico di concentrazione che per il dispositivo di misura ed utilizzato per le analisi ottiche in ambiente TRACEPRO.

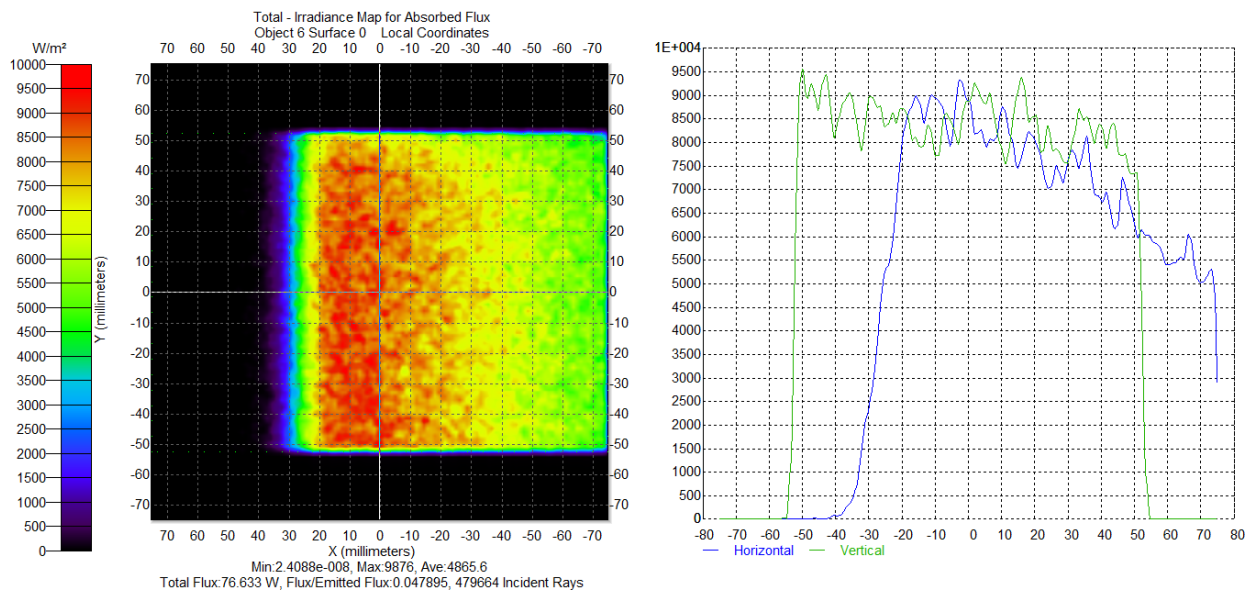


**Figura 26: Schema assonometrico del concentratore parabolico lineare con il dispositivo di misura della radiazione concentrata collocato sul tubo ricevitore**

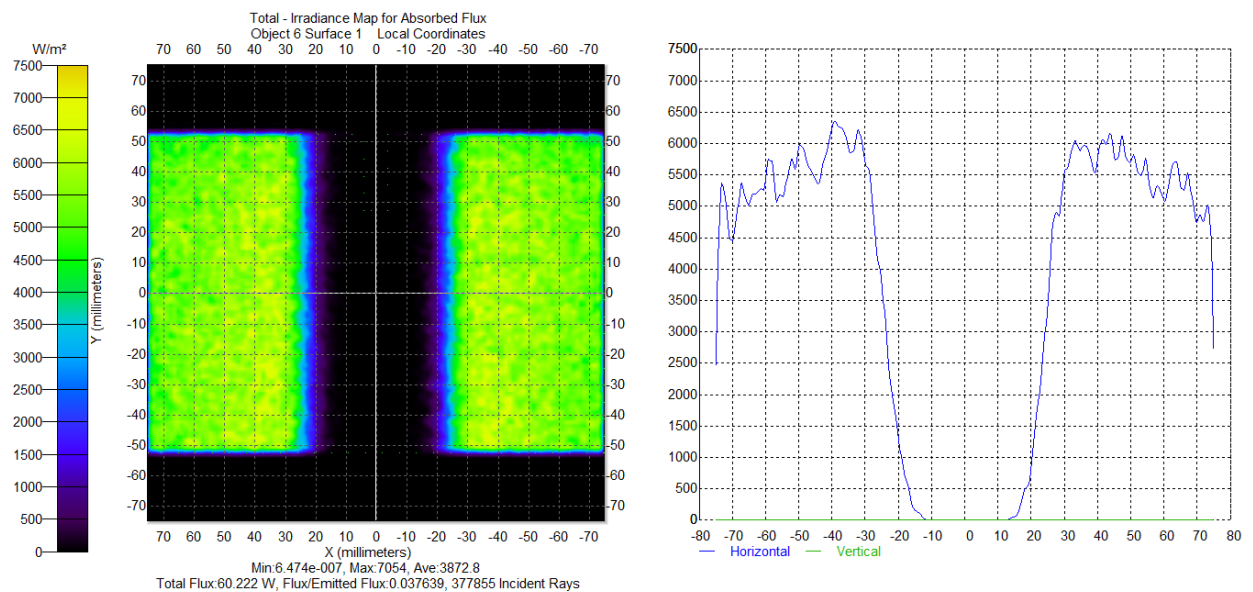
Le figure seguenti mostrano i risultati delle analisi, dove sono evidenziate le distribuzioni di flusso concentrato sia sulle superficie laterali che sul fondo del carter utilizzato a protezione del dispositivo di misura. I grafici evidenziano come i flussi massimi attesi si aggirino intorno agli 8-9 kW/m<sup>2</sup>, che per quanto elevati possono essere sopportati dalla struttura di protezione se questa è realizzata con materiali con bassa assorbanza ed elevata riflettività, in modo da ridurre al minimo gli effetti termici indotti dalle condizioni di misura.



**Figura 27: Distribuzione del flusso solare concentrato sulla parete laterale sinistra del carter di protezione del dispositivo di mappatura della radiazione concentrata**



**Figura 28: Distribuzione del flusso solare concentrato sulla parete laterale destra del carter di protezione del dispositivo di mappatura della radiazione concentrata**



**Figura 29: Distribuzione del flusso solare concentrato sulla parete inferiore del carter di protezione del dispositivo di mappatura della radiazione concentrata**

Il sistema di rotazione su cui è alloggiato il sensore, in grado di garantire la corretta mappatura del flusso solare concentrato su una semi-corona circolare, è realizzato mediante un sistema di guida su carrucole. Nello specifico e da come si evince dalla figura seguente, il sensore è alloggiato su una guida metallica semicircolare ed è trainato da un sistema a cinghia movimentato da un motore calettato all'asse di rotazione della corona circolare e poggiato su un sistema di ruote folli tali da garantire un sistema rigido di rotazione e permettere il corretto scorrimento del sensore lungo la guida semicircolare. La velocità di rotazione del motore e la precisione dello stesso durante il movimento circolare sono tali da garantire i livelli di precisione richiesti.

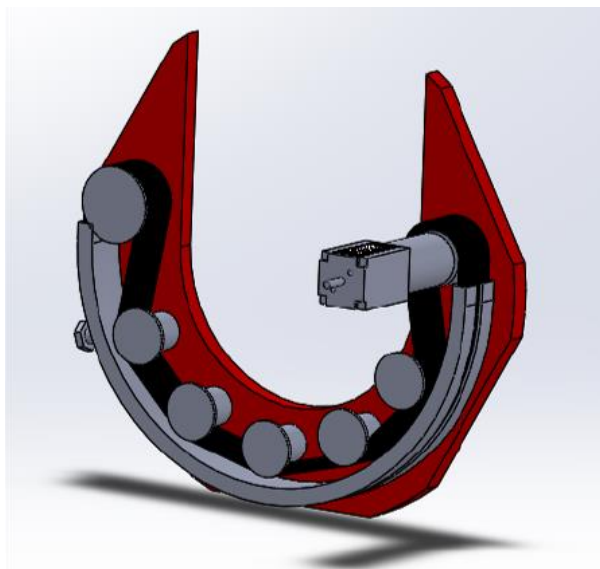


Figura 30: Dettaglio della meccanica per l’azionamento rotatorio del micro-sensore di misura

Il **sistema di traslazione orizzontale** (vedi figura seguente) è invece realizzato mediante un sistema di movimentazione a cinghia dentata calettata su una ruota direttamente collegata all’asse di rotazione di uno specifico attuatore. Tale sistema è coadiuvato da una ruota folle, la cui distanza dall’asse di trasmissione del motore rappresenta l’interasse su cui si muove la cinghia dentata. La proiezione della superficie di contatto della cinghia sul tubo è stata dimensionata in maniera tale da garantire un adeguato grip sulla superficie del vetro e tale da rendere minimo il coefficiente di attrito, consentendo di ridurre la potenza ed il peso del motore. Inoltre per garantire la giusta forza di compressione tra la superficie del tubo ricevitore ed il sistema di movimentazione orizzontale, al variare del diametro dei tubi, è stato realizzato un apposito sistema elastico, con regolazione della tensione mediante opportuna vite, ancorato a due dei quattro assi orizzontali di collegamento dei collari.

Relativamente alla precisione in fase di traslazione lungo l’asse del tubo, questa viene garantita dal fatto che la cinghia ha un numero di denti tale da rendere compatibile la precisione del motore durante la rotazione con l’accoppiamento tra ruota madre e cinghia dentata. Infine i due collari sono corredati di opportuni sensori di prossimità che impediscono al dispositivo di avvicinarsi ad ostacoli, garantendo un movimento di traslazione lungo l’asse del tubo ricevitore in assoluta sicurezza.

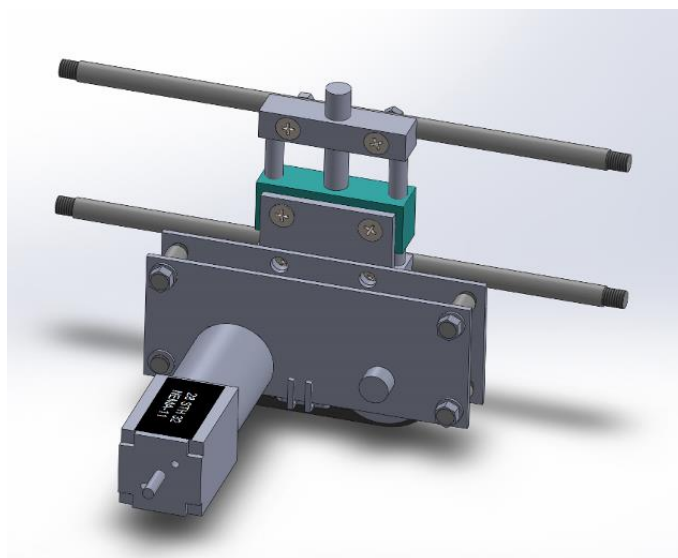


Figura 31: Dettaglio della meccanica per l’azionamento traslatorio del dispositivo

## Fase 2

La seconda fase ha riguardato essenzialmente il dimensionamento elettromeccanico degli attuatori utilizzati dal dispositivo.

Si è proceduto ad individuare le caratteristiche degli attuatori mediante un'analisi dei componenti presenti sul mercato, in maniera tale da garantire in caso di malfunzionamento la facile reperibilità di ricambi e/o la sostituzione degli stessi. La scelta di tali caratteristiche è stata motivata dal fatto che questi dispositivi risultassero altamente precisi, affidabili, aventi peso ridotto, alimentati in CC ed aventi una potenza assorbita compatibile con il parco batterie installato a bordo macchina, che è stato dimensionato per una autonomia di funzionamento in continuo di circa 60 minuti.

La scelta è ricaduta su un particolare motore bidirezionale passo-passo in corrente continua avente le caratteristiche riportate nella figura seguente. Il motore è prodotto dall'azienda Nema – modello NEMA 11 – ed è del tipo con riduttore epicicloidale tale da garantire una precisione inferiore ad 1/10 di grado ed una velocità di rotazione di almeno 1 rad/sec. In tabella vengono riportate le caratteristiche principali.

Caratteristiche principali del motore NEMA-11 28STH32



Motor Type	Bipolar Stepper
Step Angle	0.018°
Step Accuracy	± 5 %
Holding Torque	32 kg·cm
Rated Torque	32 kg·cm
Maximum Speed	35 RPM
Acceleration at Max Speed	1.5E+06 1/16 steps/sec <sup>2</sup>
Recommended Voltage	12 V DC
Rated Current	670 mA
Coil Resistance	5.6 Ω
Phase Inductance	3.4 mH
Shaft Diameter	6 mm
Rear Shaft Diameter	3.9 mm
Mounting Plate Size	NEMA - 11
Weight	243.6 g
Number of Leads	4
Wire Length	300 mm
Gearbox Type	Planetary
Gear Ratio	99 <sup>1044</sup> / <sub>2057</sub> : 1
Backlash Error	1 1/2°
Maximum Strength of Gears	32 kg·cm
Shaft Maximum Axial Load	25 N
Shaft Maximum Radial Load	35 N

Figura 32: Foto degli azionamenti di precisione realizzati con riduttore epicicloidale del tipo a stepper

## Fase 3

Questa fase ha riguardato la progettazione e la realizzazione della logica di controllo del dispositivo, basata su una scheda elettronica integrata per la gestione della movimentazione del radiometro lungo l'asse del tubo e per la gestione della mappatura del flusso solare sulla semi-corona circolare mediante la rotazione del sensore.

L'hardware è realizzata su piattaforma Arduino con interfaccia Xbee per la trasmissione a distanza, ed implementa quanto necessario sia per l'acquisizione dei segnali provenienti dal sensore HFM (segnale in tensione della termopila e segnale proveniente dalla RTD a bordo sensore) per la misura della radiazione solare concentrata sia per il controllo degli azionamenti roto-traslatori da trasmettere via wi-fi ad un computer remoto.



Figura 33: ....

La progettazione ha riguardato inoltre anche la realizzazione di un opportuno firmware *customizzato* installato a bordo del dispositivo per la gestione di tutte le fasi di funzionamento del radiometro anche da remoto.

L'alimentazione sia della scheda di controllo che dei motori in CC, avviene mediante un alimentatore a batterie ad alte prestazioni, caratterizzato da ingombro e peso contenuto, capacità di accumulo tale da svolgere diverse misurazioni senza l'esigenza di ricaricare.

#### **Fase 4**

L'ultima fase ha riguardato la realizzazione di un software di acquisizione dati da installare su un PC remoto in grado acquisire ed elaborare i dati provenienti dal sistema di acquisizione dati e rendere questi disponibili a video in tempo reale sia sotto forma di dato numerico, sia sotto forma di grafico in maniera tale da rendere noto l'andamento dei parametri misurati durante il processo di misura.

### 3 Conclusioni

Le attività condotte nella presente annualità hanno consentito di mettere a punto un dispositivo per la mappatura del flusso solare concentrato in collettori solari a concentrazione dotati di ricevitori a geometria cilindrica. Tali dispositivo consente di acquisire una serie di informazioni utili a caratterizzare sperimentalmente le efficienze ottiche di diverse tipologie di concentratori da utilizzarsi in applicazioni solari termiche a media temperatura nei settori civile ed industriale.

### 4 Riferimenti bibliografici

- [1] Ballestrín J (2002), *A non-water-cooled heat flux measurement system under con-centrated solar radiation*. Solar Energy 73159–168.
- [2] Ballestrín J and Monterreal R (2004), *Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation*. Energy 29915–924.
- [3] Ballestrín J, Estrada C A, Rodríguez-Alonso M, Pérez-Rábago C, Langley L W, Barnes A (2006), *Heat flux sensors: calorimeters or radiometers?*, Solar Energy 801314–1320.
- [4] Ballestrín J, López M, Rodríguez J, Cañadas I, Marzo A (2009), *A solar-blind IR camera prototype*, 15th SolarPACES International Symposium. Berlin, Germany.
- [5] Ballestrín J, Valero J and García G (2010a), *One-click heat flux measurement device*, 16th SolarPACES International Symposium. Perpignan, France
- [6] Ballestrín J, Marzo A, Cañadas I, Rodríguez J (2010), *Testing a solar-blind pyrometer*. Metrologia 47646–651.
- [7] Carella G, Tartagni M (relatore), Sabatelli V (correlatore) (2015), *Misura e caratterizzazione delle proprietà ottiche di concentratori solari per applicazioni a media temperatura*. Tesi di laurea, Università degli Studi di Bologna, Scuola di ingegneria e architettura.
- [8] Diessner F (1981), *Operation manual for the measurement activities with heat flux distribution (HFD) system*. DFVLR, Cologne, Germany.
- [9] Estrada C A, Pérez-Rábago C, Ballestrín J (2008), *Development of a conical cavity calorimeter for measuring highly concentrated solar flux*. 14th SolarPACES International Conference
- [10] García G (1988), *General description of the flux measuring system of the volumetric receiver*, Internal report R-15/88GG. CIEMAT – Plataforma Solar de Almería.
- [11] Gardon R (1953), *An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation*. Review of Scientific Instruments 24366–370.
- [12] Geyer M, Lupfert E, Osuna R, Esteban A, Schiel W, Schweitzer A, Zarza E, Nava P, Langenkamp J, Mandelberg E (2002), *Eurotrough: Parabolic trough collector developed for cost-effective solar power generation*. Proceedings of 11th Solar PACES International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, CD-ROM, Zurich, Switzerland.
- [13] Groer U and Neumann A (1999), *Development and test of a high flux calorimeter at DLR Cologne*. Le Journal de Physique IV 9643–648.
- [14] Hernandez D, Ballestrín J, Neumann A (2006), *First work by the flux and tempera-ture measurement group (F.T.M) in the SOLLAB laboratory alliance*. Proceedings of the 13th SolarPACES International Symposium on Solar Thermal
- [15] Kaluza J and Neumann A (2001), *Technical brief: Comparative measurements of different solar flux gauge types*. Journal of Solar Energy Engineering 123251–255.
- [16] Kendall J M and Berdahl C M (1970), *Two blackbody radiometers of high accuracy*. Applied Optics 91082–1091.

- [17] Lüpfert E, Pottler K, Ulmer S, Riffelmann K J, Neumann A, Schiricke B (2007), *Parabolic trough optical performance analysis techniques*. Journal of Solar Energy Engineering 129147–152.
- [18] Neumann A and Groer U (1996), *Experimenting with concentrated sunlight using the DLR solar furnace*. Solar Energy 58181–190.
- [19] Neumann A and Schmitz A (1999), *The new SCATMES device for measurement of concentrated solar radiation*. Journal of Solar Energy Engineering 121116–120.
- [20] Neumann A and Schmitt G (2003), *Review of optical properties for Lambertian diffusers in solar energy application*. Proceedings of ASME 2003 International Solar Energy Conference, 231–242.
- [21] Parretta A, Antonini A, Armani M, Nenna G, Flaminio G, Pellegrino M (2007), *Double cavity radiometer for high-flux density solar radiation measurements*. Applied Optics 462166–2179.
- [22] Pérez-Rábago C A, Marcos M J, Romero M, Estrada C A (2006), *Heat transfer in a conical cavity calorimeter for measuring thermal power of a point focus concentrator*. Solar Energy 801434–1442.
- [23] Pfänder M, Lüpfert E, Heller P (2006), *Pyrometric temperature measurements on solar thermal high temperature receivers*. Journal of Solar Energy Engineering 128285–292.
- [24] Riffelmann K J, Neumann A, Ulmer S (2006), *Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region*. Solar Energy 801303–1313.
- [25] Rohner N and Neumann A (2003), *Measurement of high temperatures in the DLR solar furnace by UV-B detection*. Journal of Solar Energy Engineering 125152–158.
- [26] Sabatelli V, Marano D, Ebolese A, Bruno A, Copeta C (ENEA), *Sviluppo e validazione sperimentale di metodiche per la caratterizzazione ottica e termica di concentratori a media temperatura*. Report RdS/PAR2013/162
- [27] Shortis M R, Johnston G H G, Pottler K, and Lüpfert E (2008), *Quality analysis for solar concentrators*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 3781–87.
- [28] Ulmer S, Wolfgang R, Heller P, Lüpfert E (2002), *Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators*. Journal of Solar Energy Engineering 124182–188.
- [29] Vatel Corporation (2002), <http://www.vatell.com/newsletter.htm>.