



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo e sperimentazione di dispositivo per la misura diretta del flusso solare concentrato su superficie piana

M. Bortolato, S. Dugaria, D. Del Col



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

SVILUPPO E SPERIMENTAZIONE DI DISPOSITIVO PER LA MISURA DIRETTA DEL FLUSSO SOLARE CONCENTRATO SU SUPERFICIE PIANA

Matteo Bortolato, Simone Dugaria, Davide Del Col (UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA)

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

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Studio sperimentale per lo sviluppo di un dispositivo di misura della radiazione solare concentrata su ricevitori piani*" stipulato tra ENEA e Università degli Studi di Padova

Responsabile scientifico ENEA: Vincenzo Sabatelli

Responsabile scientifico UNIPADOVA: Prof. Davide Del Col

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1 OBIETTIVI GENERALI	5
1.2 OBIETTIVI RELATIVI ALLA SECONDA LINEA DI ATTIVITÀ (B)	5
1.3 OBIETTIVI DEL DOCUMENTO	6
2 INFLUENZA DELLA DISTRIBUZIONE NON UNIFORME DEL FLUSSO SOLARE CONCENTRATO	8
2.1 PROBLEMATICHE TECNICHE ASSOCIATE ALL'USO DI COLLETTORI SOLARI A CONCENTRAZIONE LINEARE CON FLUSSO CONCENTRATO NON UNIFORME	9
2.2 PROBLEMATICHE TECNICHE ASSOCIATE ALL'USO DI SISTEMI FOTOVOLTAICI A CONCENTRAZIONE LINEARE CON FLUSSO CONCENTRATO NON UNIFORME.....	12
3 MISURA DEL FLUSSO SOLARE CONCENTRATO	15
3.1 METODI DIRETTI PER LA MISURA DEL FLUSSO CONCENTRATO	16
3.1.1 <i>Radiometri con sensori di misura della differenza di temperatura</i>	17
3.1.2 <i>Radiometri con fotosensori</i>	22
3.1.3 <i>Calorimetri</i>	26
3.2 METODI INDIRETTI PER LA MISURA DEL FLUSSO CONCENTRATO	28
4 APPARATO SPERIMENTALE E SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI	34
5 TECNICA SPERIMENTALE E ELABORAZIONE DEI DATI	39
5.1 ELABORAZIONE DATI	39
6 DISCUSSIONE DEI RISULTATI E MODELLIZZAZIONE.....	42
6.1 MODELLIZZAZIONE	46
7 CONCLUSIONI.....	49
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	50

Sommario

In questo documento si riportano i risultati dell'attività di ricerca e sperimentazione condotte su componenti solari a concentrazione a fuoco lineare per applicazioni distribuite di piccola taglia a media temperatura (da 100 a 250°C). In particolare, il tema centrale dell'attività di ricerca è la misura diretta della radiazione solare concentrata e della sua distribuzione su ricevitori a geometria piana, sia di tipo solo termico che di tipo ibrido termico – fotovoltaico.

Nell'ambito delle attività di progettazione del sistema di misura del flusso concentrato sono state analizzate le problematiche inerenti a tale tipologia di misura per applicazioni solari termiche a media temperatura, a valle delle quali è stata effettuata la scelta di un microsensore di tipo *HFM* per la misura diretta del flusso concentrato. Coerentemente con le geometrie del concentratore parabolico a fuoco lineare e del ricevitore piano, è stato progettato il sistema di movimentazione lineare semiautomatizzato a due assi che permette di analizzare la distribuzione di flusso concentrato nella regione di concentrazione di un ricevitore piano. Relativamente alla campagna sperimentale è stata sviluppata una metodologia per la misura diretta del flusso concentrato e della sua distribuzione. Tale campagna di misura ha portato ad una mappatura discretizzata del flusso concentrato sul piano di ricezione della radiazione solare concentrata. L'utilizzo di un opportuno metodo di interpolazione dei dati, insieme con l'integrazione della distribuzione del flusso concentrato sulla totale superficie del ricevitore piano, ha portato all'estrapolazione dei valori di potenza termica solare incidente sulla superficie piana di ricezione. Dalla stima di questa grandezza è possibile valutare le prestazioni ottiche dei componenti del collettore solare a concentrazione in esame. Inoltre si è determinato accuratamente la dimensione dell'immagine solare prodotta attorno alla linea focale. Infine, i risultati sperimentali sono stati confrontati con i modelli ottici del collettore solare sviluppati all'interno di un ambiente software di *ray-tracing*.

Il primo capitolo introduce gli obiettivi dell'attività di ricerca presentando una breve panoramica sullo sfruttamento dell'energia solare termica per applicazioni a media temperatura attraverso sistemi solari a concentrazione a fuoco lineare.

Le problematiche tecniche connesse all'uso di concentratori a fuoco lineare con distribuzione del flusso solare non uniforme sul piano di ricezione sono discusse nel secondo capitolo. Sono illustrate le principali problematiche legate all'uso di flussi solari concentrati distribuiti non uniformemente nei sistemi solari termici e fotovoltaici a concentrazione lineare.

Nel terzo capitolo vengono presentate e discusse le metodologie per la misura del flusso solare concentrato. La prima parte riguarda l'analisi dei metodi diretti mentre il secondo paragrafo si concentra sui metodi indiretti.

Il quarto capitolo descrive la progettazione e la composizione dell'apparato sperimentale in esame. Si giustifica la scelta del microsensore *HFM* e si illustrano i principi di progettazione del sistema di movimentazione.

Il capitolo quinto riguarda le tecniche sperimentali adottate con discussione dei risultati ottenuti. Il capitolo contiene inoltre la descrizione del modello ottico del concentratore e il confronto fra i risultati sperimentali e le previsioni del modello di *ray-tracing*.

Infine, si presentano le principali conclusioni di questo lavoro.

1 Introduzione

Il presente lavoro viene presentato come rapporto tecnico al *Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2014*. Tale accordo è finalizzato a ridurre il costo dell'energia elettrica per gli utenti finali, migliorare l'affidabilità del sistema e la qualità del servizio, ridurre l'impatto del sistema elettrico sull'ambiente e sulla salute, consentire l'utilizzo razionale delle risorse energetiche ed assicurare al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

In particolare, l'attività di ricerca è attinente all'area prioritaria di ricerca *“Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica”*. Obiettivo di questa area di ricerca è 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. Lo scopo principale del progetto è dunque quello di favorire una crescita nel ricorso a queste tecnologie avanzate di climatizzazione degli edifici. Tale obiettivo richiede parallelamente:

- a. sviluppo di componenti innovativi e competitivi, in grado di fornire adeguate prestazioni a costi contenuti;
- b. sviluppo di una varietà di soluzioni tecnologiche che consentano la scelta ottimale per ogni situazione climatica presente nel territorio nazionale.

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 riguarda lo sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento della componente rinnovabile per il condizionamento estivo. In particolare, l'attenzione è posta sullo studio di pompe di calore ad assorbimento, pompe elettriche elio-assistite, *heat-pipe*, pompe di calore a CO₂, sistemi *desiccant* e pompe geotermiche. Per questo scopo si prevede la realizzazione di impianti prototipali, laboratori di qualificazione e 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 di climatizzazione sia estiva che invernale. In questo contesto si svilupperanno: 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 telediagnostica con sistemi di monitoraggio remoto. Ad oggi queste tematiche risultano ancora poco sviluppate, ma si prevede un crescente interesse per il prossimo futuro.

Il presente lavoro afferisce, nell'ambito delle attività finalizzate allo sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento delle energie rinnovabili per il condizionamento estivo, alla seconda linea di attività B dal titolo *“Facility per la caratterizzazione di componenti solari per applicazioni a media ed alta temperatura”*.

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

Obiettivo generale di questa linea di attività è l'analisi 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 ed alla produzione di calore per alimentare processi co-generativi ad uso industriale.

Le attività relative al *PAR 2014* hanno riguardato le seguenti due tematiche:

- Subtask B.1 : Caratterizzazione e sperimentazione di ricevitori ottimizzati per applicazioni solari termiche a media temperatura
- Subtask B.2 : Sviluppo e sperimentazione di dispositivi per la misura diretta del flusso solare concentrato in collettori a media temperatura

1.3 Obiettivi del documento

Con riferimento all'obiettivo "Sviluppo e sperimentazione di dispositivi per la misura diretta del flusso solare concentrato in collettori a media temperatura" afferente al progetto "Utilizzo del calore solare e ambientale per la climatizzazione", il presente documento riporta gli esiti delle attività di ricerca e sperimentazione condotta presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova su componenti solari a concentrazione in vista della loro ottimizzazione per applicazioni distribuite di piccola taglia a media temperatura. Nello specifico, il tema centrale dell'attività riguarda la *misura diretta della radiazione solare concentrata e della sua distribuzione su ricevitori a geometria piana, sia di tipo solo termico che di tipo ibrido termico - fotovoltaico*.

Obiettivo primario della ricerca è la definizione di una possibile metodologia sperimentale per determinare il *fattore di intercettazione*, la *dimensione dell'immagine solare* a cavallo della linea focale e il *rendimento ottico del concentratore*. Tale metodologia di indagine sperimentale risulta imprescindibile per la valutazione e l'ottimizzazione delle prestazioni di un collettore solare a concentrazione per la produzione di energia termica da utilizzare per processi industriali o per *solar-cooling* in accoppiamento con sistemi ad assorbimento a singolo o doppio effetto.

Infatti la richiesta di energia termica a media temperatura è molto comune in ambito industriale, specialmente nei settori alimentare, tessile e chimico. Alcuni tipici esempi applicativi di calore di processo a media temperatura in questi ambiti sono operazioni di lavaggio e pigmentazione di vestiti, distillazione, trattamento o sbiancamento di superfici, essiccazione, pastorizzazione e sterilizzazione di prodotti alimentari. La richiesta di energia per queste utenze è generalmente costante nell'arco dell'intero anno, per cui l'integrazione di sistemi solari risulta semplificata. L'utilizzo di sistemi solari per soddisfare la loro domanda di energia termica permette di ridurre le emissioni di gas responsabili dell'effetto serra rispetto all'utilizzo di soluzioni concorrenti che prevedono la combustione da fonte fossile o di gas naturale. Inoltre, 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. 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 la fornitura diretta calore può essere affiancata alla produzione di energia elettrica, tipicamente sfruttando le tecnologie fotovoltaiche. Ne consegue che oltre alla climatizzazione elio-assistita in ambito residenziale, e la produzione diretta di calore di processo per ambito industriale, le tecnologie solari termiche a 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. In quest'ottica, i collettori solari tradizionali piani o a tubi evacuati non consentono di raggiungere livelli di temperatura tali da permetterne l'applicazione in questo ambito soprattutto perché non presentano efficienze soddisfacenti nel *range* della media temperatura. Pertanto l'attenzione sarà rivolta a sistemi solari a concentrazione da abbinare tipicamente a sistemi fotovoltaici o in alternativa a micro-turbine per la produzione congiunta di calore e/o freddo ed elettricità. Diverse attività di ricerca e sviluppo tecnologico sono attualmente focalizzate sullo studio di sistemi per la concentrazione solare. 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 impieghi 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 continuità con l'attività svolta nella precedente annualità, l'oggetto dell'attività di ricerca è la progettazione e la realizzazione di un dispositivo prototipale per la mappatura del flusso solare concentrato in collettori solari dotati di ricevitori piani per la produzione di energia termica a media temperatura. Le attività prevedono, nello specifico, la progettazione e la realizzazione di un sistema per la misura sperimentale diretta del flusso solare concentrato e della sua distribuzione su un ricevitore piano di un collettore solare a concentrazione con fuoco lineare e l'elaborazione dei dati per il calcolo dei parametri prestazionali.

Il lavoro è strutturato nelle seguenti fasi:

- A. *Progettazione del sistema per la misura diretta del flusso solare concentrato*
In questa fase, si effettua la scelta del sensore per la misura diretta del flusso solare concentrato e si definisce il sistema di movimentazione lineare a due assi che permette di analizzare la distribuzione di flusso concentrato sul ricevitore piano.
- B. *Campagna sperimentale per la misura del flusso solare concentrato*
Si procede alla raccolta di dati sperimentali mirata a definire la mappatura del flusso solare concentrato sul ricevitore piano termico ed sul ricevitore ibrido termico - fotovoltaico sviluppati durante le attività delle passate annualità.
- C. *Valutazione delle prestazioni dei componenti del collettore solare a concentrazione*
Dai dati sperimentali ottenuti, si determina accuratamente la dimensione dell'immagine solare prodotta a cavallo della linea focale. Utilizzando un opportuno metodo di interpolazione dei dati ed integrando la distribuzione di flusso così ottenuta sulla totale superficie del ricevitore piano, è possibile calcolare la potenza incidente sulla superficie assorbente del ricevitore. Questa è la grandezza cardine per valutare le prestazioni dei componenti del collettore solare a concentrazione in esame. Infine, si confrontano i risultati sperimentali ottenuti con i risultati derivati dai modelli ottici del collettore solare a concentrazione sviluppati nelle precedenti annualità attraverso l'uso di *software* di *ray-tracing*.

2 Influenza della distribuzione non uniforme del flusso solare concentrato

La distribuzione della radiazione solare concentrata è un aspetto cruciale in tutte le tecnologie solari a concentrazione. Un sistema solare a concentrazione si compone principalmente di uno o più elementi ottici e di un sistema di ricezione della radiazione concentrata. Gli elementi ottici hanno lo scopo di concentrare i raggi solari e dirigerli verso la zona di ricezione il più uniformemente possibile. Se in condizioni ideali i sistemi a concentrazione possono essere distinti in sistemi a concentrazione sia puntuale oppure da lineare seconda delle caratteristiche geometriche e ottiche del concentratore, nelle reali condizioni d'uso, la regione in cui viene concentrata la radiazione solare incidente è costituita da un'area irregolare la cui forma dipende da diversi fonti di non idealità del collettore. Prima di tutto, è necessario tener conto che il disco solare ha una dimensione finita e quindi i raggi che raggiungono l'area di apertura di un concentratore non saranno perfettamente paralleli fra loro. La modellizzazione del sole per lo studio delle prestazioni di un collettore solare a concentrazione è definita attraverso la forma solare (*sunshape*) che rappresenta la distribuzione angolare dell'intensità solare. La forma solare tiene conto non solo della dimensione del disco solare ma anche di una regione circumsolare ed ha una grande influenza sulle prestazioni del sistema a concentrazione. Il mancato allineamento tra concentratore e ricevitore può essere causa di non uniformità della radiazione concentrata sulla linea di fuoco. Infatti, anche minimi difetti di allineamento possono dar luogo a notevoli differenze nell'intensità del flusso concentrato e vanno eliminati per quanto possibile. Oltre a questo, bisogna tener conto che la parte del ricevitore rivolta verso il sistema ottico verrà investita da radiazione solare non concentrata oppure può addirittura essere completamente schermata ed isolata termicamente. Pertanto in un sistema reale, la distribuzione della radiazione concentrata sarà intrinsecamente non uniforme e il flusso solare captato dall'ottica verrà concentrato e distribuito non uniformemente sulla un ricevitore.

La caratterizzazione della non uniformità nella distribuzione della radiazione concentrata dal punto di vista quantitativo tiene conto di diversi aspetti, associati alla progettazione del concentratore, alla posizione relativa tra sole e ricevitore ed a fenomeni esterni come vento e ombreggiamenti.

La geometria del concentratore e dell'elemento ottico influenzano significativamente l'intensità e la distribuzione del flusso incidente sull'elemento ricevente. La presenza di difetti di forma nel concentratore ha una significativa influenza sulla non uniformità del flusso incidente. A differenza di quanto accade nei sistemi solari non concentranti, gli effetti dovuti alla presenza di difetti nella geometria del concentratore vengono enfatizzati dalla concentrazione. Questi difetti sono riscontrabili in tutti i sistemi indipendentemente dall'elemento ottico scelto, tuttavia gli effetti sono intensificati ad alti rapporti di concentrazione. Alcuni di questi difetti sono presenti fin dal primo utilizzo in quanto dovuti alla scelta del processo di fabbricazione del concentratore stesso; altri difetti compaiono durante il normale utilizzo del concentratore a causa di deformazioni termiche o meccaniche dovute a fenomeni ambientali e di invecchiamento. Un'ulteriore causa di difetti nell'uniformità di concentrazione è il degradamento delle proprietà ottiche del sistema. Questo è principalmente dovuto al deposito continuo di residui sulle superfici dell'ottica e dell'elemento ricevente. Le impurità possono modificare le caratteristiche ottiche di riflessione e rifrazione del concentratore e ombreggiare la zona di fuoco. Anche l'invecchiamento dei materiali superficiali può portare all'insorgere di difetti ottici nel concentratore. Invecchiamento e cedimento di elementi strutturali del concentratore possono dar luogo a difetti nell'allineamento durante il normale esercizio. Difetti nell'inseguimento del sole lungo il suo percorso diurno causano anch'essi distribuzione non uniforme del flusso solare. Difetti nel tracciamento del percorso solare possono infatti causare la mancanza di illuminazione di una regione del ricevitore. In conseguenza di ciò si ha che in un sistema reale, la concentrazione e la distribuzione del flusso solare per quanto precise non saranno mai perfette.

A seconda del sistema utilizzato per la ricezione del flusso concentrato, la presenza di un flusso concentrato non uniforme può dar luogo a differenti problematiche tecniche. In sistemi solari termici a concentrazione (CST) la non uniformità del flusso concentrato causa principalmente la formazioni di gradienti termici nel

sistema ricevente. Nei sistemi fotovoltaici a concentrazione (CPV) i difetti di distribuzione coinvolgono invece fenomeni elettrici e termici che portano alla diminuzione del rendimento di conversione. Nei prossimi paragrafi vengono illustrate le principali problematiche legate all'uso di flussi solari concentrati distribuiti non uniformemente nei sistemi solari a concentrazione lineare per entrambe le applicazioni.

Le disuniformità della distribuzione del flusso concentrato, ha conseguenze anche di carattere economico: infatti la riduzione nella producibilità energetica di sistemi a concentrazione affetti da difetti nella distribuzione del flusso concentrato, ha ricadute sulla loro competitività economica e sulla capacità di attrarre investimenti. La riduzione nel rendimento di produzione può causare un aumento nel costo per unità di energia prodotta diminuendo di fatto la profittabilità economica nel lungo termine.

2.1 *Problematiche tecniche associate all'uso di collettori solari a concentrazione lineare con flusso concentrato non uniforme*

Negli impianti solari termici a concentrazione l'uniformità della distribuzione della radiazione concentrata sulla superficie dell'assorbitore è estremamente importante, sia in impianti solari a media temperatura, finalizzati alla produzione di calore, sia in impianti ad alta temperatura (solare termodinamico), in cui il calore prodotto viene utilizzato per produrre energia elettrica. Nei collettori solari termici a concentrazione, il *rapporto di concentrazione* è parametro indicativo del livello di temperatura a cui è possibile ottenere energia termica e quindi del campo di applicazioni che è possibile soddisfare con un dato sistema. Questo parametro viene calcolato dal rapporto tra l'area di apertura del concentratore e l'area dell'elemento del ricevitore che assorbe la radiazione solare concentrata. Una conseguenza di una concentrazione non precisa dei raggi solari sulla zona di fuoco è la riduzione del rapporto di intercettazione dell'assorbitore. Pertanto, la qualità della concentrazione del flusso solare è di fondamentale importanza in quanto influenza il campo d'applicazione del concentratore oltre alle prestazioni termiche dell'assorbitore e il rendimento di conversione dell'impianto stesso, qualificando il concentratore dal punto di vista ottico.

Nei sistemi a concentrazione lineare, la faccia rivolta verso l'ottica è investita da un flusso radiativo più intenso rispetto alle rimanenti facce del ricevitore. Per questo motivo la distribuzione del flusso concentrato è intrinsecamente non uniforme (Khanna, Kedare, and Singh 2013; Eck *et al.* 2007) e può portare alla formazione di intensi gradienti termici fra la superficie esposta alla radiazione e quelle non esposte. Questi gradienti possono avere gravi conseguenze sulla stabilità termica e meccanica del sistema e possono portare ad un degrado delle prestazioni dell'impianto. Oltre a ciò, quando il flusso concentrato si distribuisce a "macchia di leopardo" sulla sezione di ricezione possono formarsi *hotspots*, ovvero di zone circoscritte in cui il flusso concentrato è più intenso. I picchi di temperatura di queste zone possono essere particolarmente intensi e con possibile instaurarsi di deformazioni locali. Oltre a questo, le eccessive temperature raggiunte possono danneggiare lo strato di vernice selettiva che ricopre l'assorbitore degradando il comportamento dell'assorbitore.

Le problematiche specifiche dei sistemi termici dipendono dalla tipologia di impianto considerato. Negli grandi impianti solari ad alta temperatura a concentrazione lineare vengono utilizzati tipicamente concentratori parabolici (Figura 1) e collettori Fresnel (Figura 2). La ricezione del flusso solare concentrato è in genere affidata a tubi in acciaio ricoperti da una vernice selettiva e inseriti all'interno di tubi in vetro sottovuoto per diminuire le perdite per convezione verso l'esterno. Inoltre, la vernice che ricopre l'elemento del ricevitore presenta un elevato coefficiente di assorbimento nelle lunghezze d'onda dello spettro della radiazione solare e una bassa emissività nell'infrarosso, in modo da limitare le dissipazioni termiche per irradiazione verso l'ambiente circostante. Negli impianti solari termici ad alta temperatura, il maggiore rischio associato ad una distribuzione del flusso concentrato non uniforme è la nascita di gradienti termici in direzione assiale e lungo la circonferenza dell'assorbitore. Infatti, la presenza del vetro di incapsulamento dei tubi metallici limita le massime deformazioni ammissibili. Le dilatazioni e le flessioni indotte dalle sollecitazioni termiche lungo il ricevitore, sui grandi sviluppi assiali di questi impianti, possono portare a deformazioni del tubo fino a rottura del vetro. Queste rotture causano un aumento delle perdite termiche nei tratti di tubo scoperto rispetto a quelli in cui il vetro è intatto, con un conseguente

abbassamento del rendimento di conversione locale e totale. L'eventuale formazione di *hotspot* dovuti ad un flusso solare concentrato non uniforme, oltre a causare l'invecchiamento precoce dello strato selettivo superficiale può degradare le proprietà fisiche del fluido vettore che scorre all'interno dei tubi. Wang *et al.* (Wang et al. 2013) per questi impianti suggeriscono che le massime differenze di temperatura lungo la sezione dell'assorbitore dovrebbero essere limitate a 50 K al fine di garantire affidabilità e stabilità nelle condizioni di lavoro del fluido vettore.



Figura 1 – Impianto solare termodinamico con collettori lineari parabolici (Archimede Solar Plants).



Figura 2 – Impianto solare termodinamico con collettori lineari Fresnel (Areva).

La circolazione di alte portate all'interno dell'assorbitore, tali da garantire il raggiungimento delle condizioni di mescolamento turbolento, è una buona pratica che assicura maggiore uniformità delle proprietà e della

temperatura del fluido termovettore. Se negli impianti di grandi dimensioni questa pratica è praticamente sempre adottata, ciò non è sempre possibile negli impianti a concentrazione di piccole dimensioni tipicamente per media temperatura. Infatti, in questi impianti la necessità di garantire una certa flessibilità d'uso si oppone all'impiego di alte portate. Questo risulta particolarmente vero nei sistemi solari a concentrazione per la produzione diretta di vapore a media temperatura.

A differenza di quanto accade nei grandi impianti solari, questi impianti operano spesso con portate contenute che possono portare all'insorgere di deflussi in regime stratificato. In queste condizioni sfavorevoli è particolarmente importante evitare di lavorare con un flusso concentrato che presenta una distribuzione non uniforme sulla superficie di ricezione. Infatti, i difetti di distribuzione della radiazione concentrata sull'assorbitore possono causare una variazione particolarmente intensa del coefficiente di scambio termico lungo il suo perimetro con conseguenti cambiamenti nel titolo di vapore in uscita. Ciò porta ad un'instabilità nelle condizioni di lavoro e ad una diminuzione delle prestazioni dell'intero impianto. Anche per questa tipologia di sistema vengono generalmente impiegati concentratori lineari parabolici (Figura 3) o collettori Fresnel (Figura 4).



Figura 3 – Collettore lineare parabolico (Solar Mountain Energy).



Figura 4 – Collettore Fresnel lineare (Chromasun).

Negli impianti per media temperatura, a differenza di quanto accade in quelli ad alta temperatura, gli assorbitori possono non essere contenuti all'interno di tubi in vetro: le temperature superficiali più

contenute riducono le dispersioni termiche per convezione. I ricevitori utilizzati nei sistemi parabolici sono generalmente condotti metallici ricoperti da una vernice selettiva al cui interno scorre il fluido vettore (Figura 5). I sistemi con collettori Fresnel (Figura 6) ammettono geometrie del ricevitore più varie (Zhu *et al.* 2014; Montes *et al.* 2014) rispetto a quelli con concentratori parabolici in cui il profilo a sezione circolare rimane lo standard.



Figura 5 – Particolare di un ricevitore tubolare di un collettore lineare parabolico (Siemens)



Figura 6 – Ricevitore e ottica secondaria in un sistema a concentrazione lineare Fresnel (Häberle *et al.* 2002).

2.2 *Problematiche tecniche associate all'uso di sistemi fotovoltaici a concentrazione lineare con flusso concentrato non uniforme*

In un impianto fotovoltaico a concentrazione (CPV), la principale conseguenza di una distribuzione non uniforme del flusso concentrato è la riduzione del rendimento di conversione delle celle. Un sistema CPV è costituito da un sistema ottico primario di concentrazione, del tutto simile a quello utilizzato per gli

impianti solari termici, da un'eventuale ottica secondaria e da un ricevitore a celle fotovoltaiche (Figura 7). L'uso di celle fotovoltaiche permette una conversione diretta della radiazione solare in corrente elettrica. La concentrazione della radiazione garantisce a tali sistemi la possibilità di raggiungere rendimenti di conversione superiori rispetto ai sistemi fotovoltaici piani convenzionali. Le dimensioni più contenute della area di ricezione rispetto a quella dei ricevitori termici richiedono una maggiore precisione di concentrazione e per questo spesso si richiede spesso l'uso di un'ottica secondaria da affiancare a quella di concentrazione primaria.

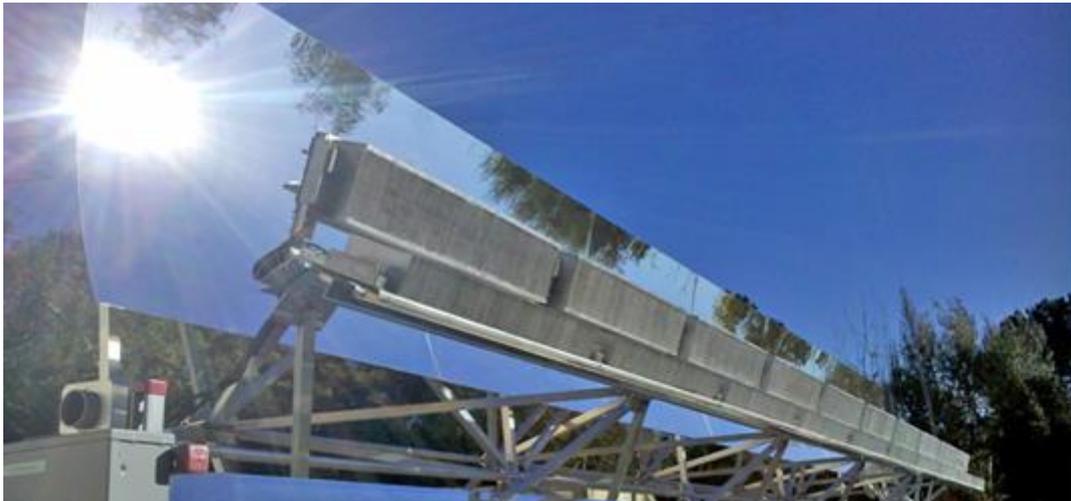


Figura 7 – Sistema CPV con concentratore parabolico lineare (Skyline Solar)

Le prestazioni ideali di una cella solare inserita in un sistema a concentrazione vengono degradate da una serie di dissipazioni legate alla non idealità dei componenti usati che ne possono ridurre il rendimento fino al 40%, come riportato nella Figura 8 tratta dal lavoro di Baig *et al.* (2013).

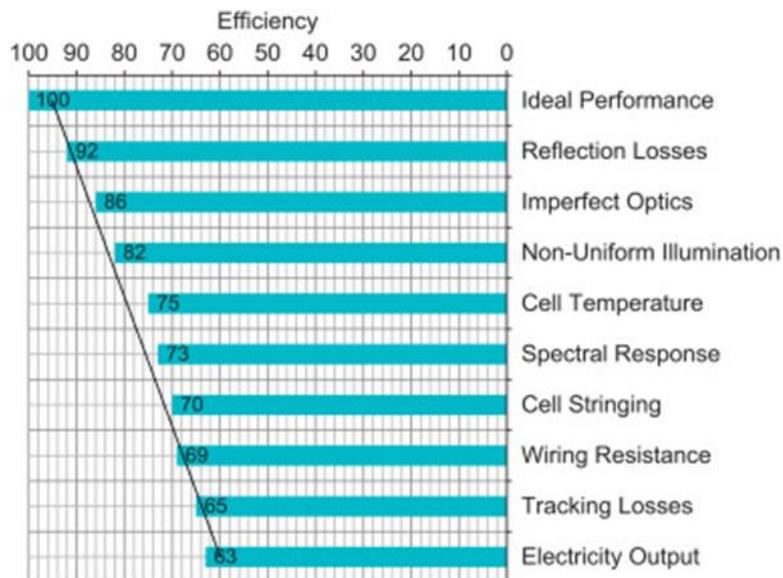


Figura 8 – Fonti di perdite in una cella fotovoltaica (Baig *et al.* 2013)

La non uniformità nel profilo di illuminazione di una cella fotovoltaica causa seri problemi al funzionamento di un sistema CPV. Alcuni di questi sono legati direttamente alla diminuzione delle prestazioni elettriche delle celle, mentre altri interessano il rendimento globale dell'intero sistema CPV. E' da notare che alcune

caratteristiche elettriche vengono ridotte indirettamente a causa degli effetti di termici dovuti anch'essi alla non uniformità del flusso incidente.

La non idealità nei componenti del sistema di concentrazione elementi è causa di flussi solari concentrato di intensità diversa sulle superfici delle celle. Le regioni soggette a un flusso concentrato più intenso generano correnti più intense raggiungendo oltretutto temperature superiori (*hotspot*). Le regioni meno illuminate invece, generano correnti meno intense. La differenza nell'intensità delle correnti generate dalle due zone porta alla nascita di correnti parassite all'interno della cella con conseguenti aumenti della potenza elettrica dissipata e diminuzione di quella estraibile. Inoltre, la presenza di disparità e di non uniformità del flusso solare concentrato proveniente dal concentratore causa un aumento localizzato della temperatura e della resistività elettrica. Questo provoca un significativo deterioramento delle prestazioni della cella rispetto alle condizioni nominali. Oltre a ciò, nei sistemi CPV, la risposta spettrale dell'ottica può avere una grossa influenza sulle prestazioni delle celle fotovoltaiche. Tipicamente questi sistemi utilizzano celle multi-giunzione che possono essere utilizzate con alti rapporti di concentrazione ad alte temperature e presentano maggiore resistenza all'invecchiamento. Ciascuna giunzione costituente la cella lavora in campi spettrali differenti, pertanto mano a mano che lo spettro solare si modifica differenti porzioni di cella limitano la massima densità di corrente generabile e le prestazioni della cella. Lo spettro solare del flusso concentrato è lievemente modificato dal concentratore rispetto quello della luce proveniente dal sole. Pertanto la non uniformità nella distribuzione influenzerà anche la risposta spettrale delle celle che presenteranno rendimenti inferiori rispetto a quelli ideali.

La presenza di una distribuzione disuniforme può avere effetto anche sul comportamento dei circuiti formati da più celle connesse elettricamente. Generalmente le celle fotovoltaiche utilizzate per sistemi CPV vengono connesse in serie in una o più stringhe lineari. Idealmente queste celle sono attraversate dalla medesima corrente elettrica. Nelle condizioni reali di esercizio però l'intensità di corrente generata da ciascuna cella dipende dal suo valore di illuminazione. Pertanto, in caso di distribuzione non uniforme del flusso concentrato, la cella meno illuminata limita il valore di corrente e le prestazioni dell'intera stringa a cui appartiene. L'energia elettrica generata dalle celle della stringa interessate da un maggiore flusso solare sarà dissipata termicamente sulle celle meno illuminate, diminuendone ulteriormente le prestazioni elettriche.

Per questi motivi è molto importante poter caratterizzare la non uniformità nella distribuzione del flusso concentrato e valutare il reale comportamento di un sistema CPV rispetto al suo comportamento ideale.

3 Misura del flusso solare concentrato

La misura del flusso totale concentrato incidente sulla superficie assorbente di un ricevitore assume una grande importanza per la valutazione delle prestazioni ottiche del concentratore e per monitorarne l'andamento nel tempo. Infatti a causa dei fenomeni analizzati nel precedente capitolo, la distribuzione del flusso concentrato è molto lontana dall'essere uniforme. Una distribuzione fortemente non uniforme del flusso concentrato su un ricevitore termico/fotovoltaico comporta, una penalizzazione del rendimento di conversione della radiazione solare in energia termica/elettrica. La misura del flusso termico concentrato e della sua distribuzione nella regione di concentrazione risulta pertanto di fondamentale importanza per una progettazione accurata del ricevitore. Ad evidenza dell'importanza nelle tecniche di misura della radiazione concentrata, recentemente si è iniziato a considerare l'idea di realizzare un controllo del sistema di puntamento degli eliostati negli impianti formati da grandi campi di eliostati e ricevitore centrale attraverso una misura continua del flusso concentrato.

La misura del flusso concentrato e della sua distribuzione permette di valutare alcuni parametri utili al confronto delle prestazioni di diverse tipologie di ricevitori operanti con la medesima soluzione di concentrazione. In generale, il rendimento globale η di un collettore solare a concentrazione è esprimibile attraverso dalla seguente formula:

$$\eta = \eta_{opt,0^\circ} \cdot K(\Phi) \cdot \eta_{rec}$$

dove $\eta_{opt,0^\circ}$ è definito come *rendimento ottico di picco*, $K(\Phi)$ è il *modificatore dell'angolo di incidenza* e η_{rec} è il *rendimento di conversione del ricevitore*. Il rendimento ottico di picco $\eta_{opt,0^\circ}$ si riferisce alla condizione in cui i raggi solari incidenti sono normali rispetto all'area di apertura del concentratore ed è ottenuto dal prodotto tra il *coefficiente di riflessione* degli specchi ρ , il *fattore di intercettazione*, il *coefficiente di assorbimento* del rivestimento selettivo del ricevitore ed eventualmente il coefficiente di trasmissione della copertura vetrata del ricevitore qualora presente. Il *fattore di intercettazione* è definito come il rapporto tra la potenza della radiazione incidente la superficie dell'assorbitore e la potenza della radiazione riflessa dagli specchi. Questo parametro tiene conto di tutte le cause di non idealità descritte in precedenza ed è uno dei parametri che è possibile definire sperimentalmente quando si misura il flusso concentrato. Il *modificatore dell'angolo di incidenza* esprime l'effetto dell'angolo di incidenza dei raggi solari sull'area di apertura del concentratore e include le perdite ottiche e geometriche del sistema che si incontrano quando l'angolo di incidenza dei raggi solari è diverso da 0° . In un collettore a concentrazione con sistema di inseguimento a due assi, tale fattore è sempre unitario, mentre se il sistema di inseguimento è a singolo asse, è possibile misurare tale parametro nell'ambito dell'indagine oggetto di questo report. Infine, il *rendimento di conversione* del ricevitore è il rapporto tra la potenza utile ottenuta (termica o elettrica) rispetto alla potenza della radiazione incidente sull'area dell'elemento assorbitore. Questo è il parametro che permette il confronto tra diverse tipologie di ricevitori installabili sullo stesso concentratore.

In collettori termici a concentrazione, il calcolo del rendimento di conversione a seguito delle misure di flusso concentrato dà modo di verificare l'efficacia della configurazione ed dei materiali adottati (in particolare, del rivestimento dell'assorbitore) nel minimizzare le dissipazioni verso l'ambiente esterno. In un collettore fotovoltaico a concentrazione è possibile valutare quanto non uniformità nella distribuzione del flusso concentrato sulla regione di concentrazione penalizzi il rendimento delle celle collocate sul ricevitore. È quindi possibile valutare quale configurazione sia la più vantaggiosa dal punto di vista economico ed operativo.

In collettori solari parabolici a concentrazione lineare, la misura della radiazione concentrata permette di valutare la bontà del sistema di ancoraggio degli specchi riflettenti del concentratore sul sistema di sostegno, la durabilità nel tempo del coefficiente di riflessione degli stessi, la variazione di precisione del sistema di inseguimento e le variazioni sul posizionamento del ricevitore.

Prima di descrivere in maniera approfondita le diverse tecniche adottate per la misura del flusso concentrato e della sua distribuzione nella regione di concentrazione, vale la pena di evidenziare quali siano i requisiti generali che dovrebbero caratterizzare un sistema sperimentale per la misura del flusso concentrato. Innanzitutto, il sistema deve garantire la massima sicurezza operativa una stabilità adeguata alle temperature d'esercizio. Per realizzare un'analisi solida, è importante che i risultati ottenuti abbiano una bassa incertezza sperimentale di misura e che la tecnica di misura sia affidabile e facilmente adottabile ed implementabile, almeno nello stesso tipo di collettori solari a concentrazione analizzati. Il sistema deve presentare una bassa sensibilità ai carichi operativi ed alle condizioni ambientali, come ad esempio la presenza di vento, polveri o l'esercizio in presenza di elevata umidità dell'aria. Infine non sono da sottovalutare gli aspetti economici: l'investimento iniziale, i costi di manutenzione e di esercizio dovranno essere il più possibile contenuti.

3.1 *Metodi diretti per la misura del flusso concentrato*

In questa categoria di tecniche sperimentali di misura del flusso concentrato, si fa riferimento all'utilizzo di sensori di misura in grado di fornire un segnale elettrico di risposta direttamente associabile alla irradianza solare incidente sulla superficie su cui sono installati. A seconda dell'area di apertura del dispositivo di misura, è possibile ottenere un valore di flusso incidente sulla totale area di concentrazione oppure un valore pressoché puntuale del flusso concentrato all'interno della regione di concentrazione. Quest'ultimo caso è particolarmente interessante per le applicazioni sperimentali perché oltre al valore del flusso concentrato permette di ottenere la sua distribuzione sull'elemento assorbente del ricevitore. Per operare tale misura si può far riferimento a due modalità (Röger *et al.* 2014):

- utilizzo di più sensori distribuiti all'interno della regione di concentrazione;
- installazione di sensori in sistemi di movimentazione.

Entrambe le metodologie, permettono la mappatura del flusso concentrato nella regione di concentrazione o sulla superficie dell'elemento assorbitore del ricevitore attraverso l'interpolazione dei valori misurati in punti specifici. Nel caso del sistema a più sensori distribuiti, si rende necessario un numero molto elevato di sensori per garantire un'accettabile accuratezza dei risultati. Questo comporta elevati costi di investimento iniziale. D'altro canto la seconda opzione pur offrendo costi più contenuti prevede un'attenta progettazione del sistema di misura in modo che questo sia adatto alle caratteristiche geometriche e funzionali del collettore a concentrazione considerato (Figura 9). Un altro vantaggio del sistema con sensori movimentati, è l'uso di un sistema in grado di scorrere rapidamente l'intera regione di interesse in prossimità del fuoco. La rapidità di scansione dell'area di ricezione permette di ottenere molti valori sperimentali del flusso concentrato riducendo l'incertezza della mappatura finale.

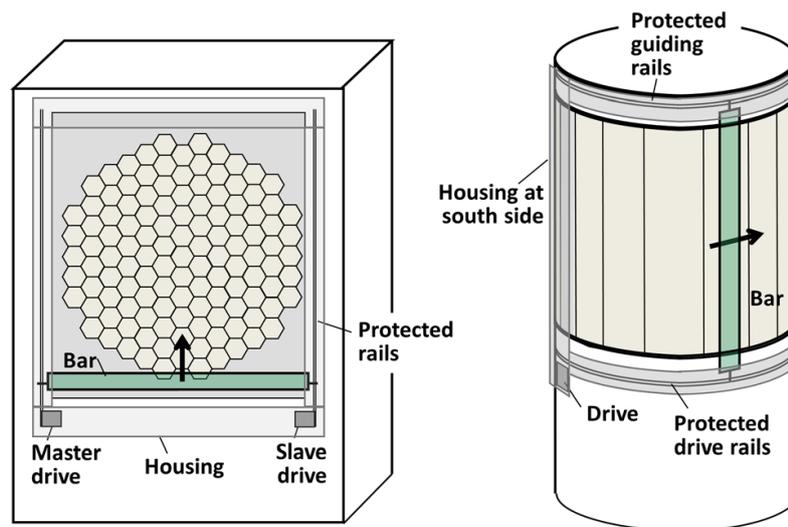


Figura 9 – Esempi di sistemi di movimentazione lineare su cui collocare i sensori per la misura del flusso concentrato adattati a ricevitori a cavità (sinistra) o a ricevitori cilindrici esterni per campi di eliostati. (Röger et al. 2014)

Gli strumenti di misura utilizzati nei collettori solari a concentrazione sono principalmente radiometri e calorimetri (Ballestrín, Burgess, and Cumpston 2012). Alcuni radiometri permettono di rilevare il flusso radiativo incidente mediante la misura della differenza di temperatura attraverso una parte dello strumento. In questo caso il sensore è costituito da una termocoppia oppure da una termopila. Una termocoppia è composta da due materiali diversi collegati in due giunti fra i quali si definisce un circuito: per l'effetto Seebeck, si genera una forza elettromotrice il cui valore è funzione univoca della differenza di temperatura tra i due giunti. Una termopila, invece, è un sensore di temperatura costituito da più termocoppie connesse in serie e pertanto caratterizzato da una maggiore sensibilità. In genere, le termopile sono utilizzate nei sensori per misurare la differenza di temperatura attraverso uno strato con conduttività termica nota in conseguenza di un flusso radiativo incidente sullo strumento. In altri radiometri, l'elemento sensibile è un fotorilevatore. I calorimetri sono impiegati per misurare il flusso solare concentrato mediante la misura della potenza termica trasferita al fluido di raffreddamento che scorre al loro interno. Pertanto risulta fondamentale progettare tali dispositivi in maniera tale da minimizzare le dissipazioni termiche radiative e convettive e le perdite per riflessione. In generale i calorimetri sono costruiti con aree di apertura ampie, per la misura del solo flusso totale incidente su un'area, ma recentemente sono state sviluppate unità più piccole per ottenere una risoluzione spaziale più dettagliata del flusso solare concentrato.

3.1.1 Radiometri con sensori di misura della differenza di temperatura

I sensori disponibili in commercio più comunemente impiegati per la misura dell'irradianza solare concentrata, sono i radiometri di Gardon e i microsensori di flusso termico (*HFM*s - *heat flux microsensors*). I radiometri di Gardon sono generalmente costituiti da un corpo cilindrico di rame alla cui estremità è collegata una sottile lamina circolare in costantana. Un sottile filo di rame è collegato al centro della lamina sottile, in modo da completare la coppia termoelettrica bimetallica tra centro e bordo esterno della lamina (Figura 10). Se il sensore è sottoposto ad un flusso termico uniforme, la differenza di temperatura misurata dalla termocoppia è proporzionale al flusso termico incidente. In passato, soprattutto per flussi termici molto elevati, veniva utilizzata grafite colloidale per rivestire la superficie sensibile del ricevitore al fine di migliorarne le capacità di assorbimento. Oggigiorno, l'uso della grafite colloidale è stato sostituito da un rivestimento di una vernice nera ad alto coefficiente di assorbimento (*Zynolite* o *Pyromark*).

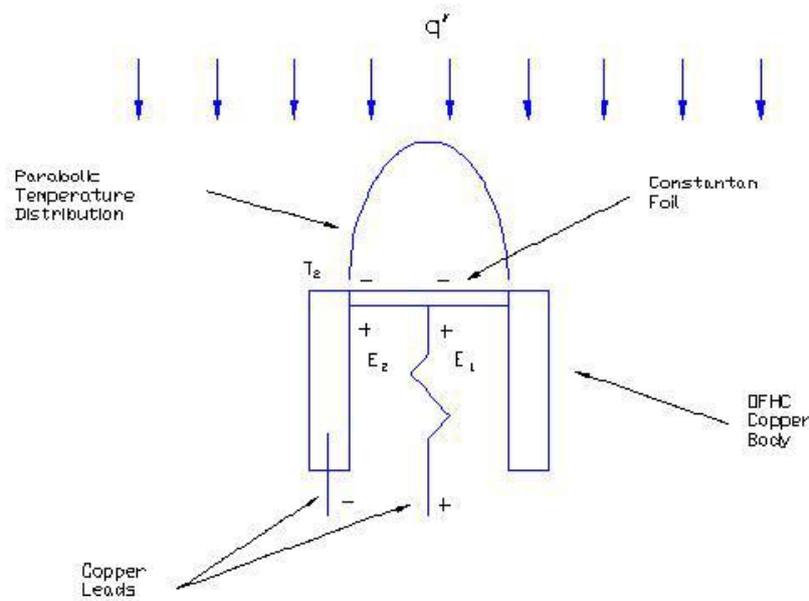


Figura 10 – Geometria del radiometro di Gardon (Vatell Corporation 2015)

Questo strumento permette di misurare flussi termici convettivi e radiativi: nelle applicazioni in collettori solari a concentrazione, è quindi necessario verificare che il flusso termico scambiato per convezione dalla faccia del sensore all'ambiente esterno sia trascurabile rispetto al flusso radiativo incidente, che rappresenta la grandezza fisica di interesse. Esistono anche versioni dei radiometri di Gardon in cui la faccia del sensore è dotata di una copertura in zaffiro o in seleniuro di zinco per la misura del solo flusso termico radiativo (Diller 2000). In questi dispositivi, la presenza della finestra riduce l'angolo di accettazione ad un valore minore di 180° e introduce degli elementi di cui tener conto nella conversione del segnale elettrico di uscita: il coefficiente di trasparenza del vetro e la sua variazione in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari. Il *range* del segnale di uscita in tensione dello strumento è limitato tra 0 mV e 10 mV, poiché per tensioni superiori, la risposta del dispositivo non è più lineare rispetto al flusso termico incidente e la calibrazione fatta dai costruttori non è più valida. Inoltre, per segnali in uscita maggiori di 20 mV, lo strumento può essere seriamente danneggiato (Vatell Corporation 2015). Pertanto, il termometro a termocoppia in rame e costantana può misurare una differenza massima di temperatura di 214°C a cui si associa un flusso termico massimo che dipende dalle caratteristiche geometriche dello strumento, in particolare dal raggio e dallo spessore del disco sottile in costantana. Da tali parametri dipendono anche la sensibilità e l'accuratezza dello strumento: a parità di spessore del disco di costantana, minore è il diametro frontale, maggiore sarà l'accuratezza ma a spese della sensibilità (Childs, Greenwood, and Long 1999). In genere, i costruttori adottano un diametro della faccia frontale dello strumento variabile tra 0.5 mm e 25 mm circa e l'accuratezza nella misura del flusso termico è di $\pm 3\%$. Questi strumenti sono impiegati per la mappatura del flusso solare nella zona focale dei collettori a concentrazione per la loro robustezza e la loro semplicità, ma presentano un tempo di risposta di circa mezzo secondo, pertanto, la velocità di acquisizione dei dati da parte del *data logger* utilizzato non può essere molto alta. Infine, per applicazioni che richiedono un utilizzo continuo del sensore, esistono delle versioni dotate di un sistema di raffreddamento attivo del corpo del sensore tramite un flusso d'acqua che rimuove costantemente il flusso termico incidente. I radiometri di Gardon utilizzati come riferimento sono in genere calibrati utilizzando un tubo cilindrico di grafite riscaldato elettricamente e ripartito in due parti identiche che funge da corpo nero a doppia cavità e a temperatura variabile (Ballestrín *et al.* 2003; Ballestrín and Monterreal 2004). La temperatura interna del corpo nero è misurata attraverso un pirometro con tracciabilità *NIST* che viene introdotto da una delle due estremità. La temperatura massima raggiunta dal corpo nero durante la calibrazione è di circa 850°C . Una volta che il sistema si è stabilizzato, viene rapidamente introdotto il radiometro di riferimento dall'altra estremità, in modo che la superficie dove è posto l'elemento sensibile sia molto vicina alla parete centrale

di partizione e il segnale in uscita è continuamente registrato. Durante la calibrazione vengono assunte valide le ipotesi nelle quali è possibile applicare la *legge di Stefan-Boltzmann* che permette di determinare l'emissione emisferica globale di un corpo nero in funzione della sua temperatura.

La calibrazione del sensore di riferimento è poi trasferita ai sensori commerciali tramite confronto delle loro risposte in tensione in una fornace di calibrazione dotata di una piastra di grafite che irradia in maniera omogenea quando si riscalda per il passaggio di una corrente elettrica al suo interno.

Ballestrin *et al.* (2003) hanno osservato che l'irradianza spettrale di un corpo nero a 850°C differisce in maniera rilevante rispetto all'irradianza spettrale solare. Questo porta ad un errore sistematico nel momento in cui tali sensori sono impiegati per la mappatura del flusso solare in collettori a concentrazione a causa dell'assorbimento spettrale dei rivestimenti che non è uniforme. In Figura 11, vengono riportati per confronto gli spettri di irradianza di un corpo nero a 850°C e a 5730°C, lo spettro solare a diversi valori di massa d'aria (*AM*) e l'andamento dei coefficienti di assorbimento in funzione della lunghezza d'onda di una vernice nera e della grafite colloidale. Come si osserva, il corpo nero utilizzato per la procedura di calibrazione irradia principalmente nel campo dell'infrarosso (0.7 μm - 10 μm). Dall'analisi condotta, è emerso in particolare che sensori calibrati in corpi neri a doppia cavità sovrastimavano il flusso solare concentrato. Grazie all'analisi dell'assorbimento spettrale di due rivestimenti impiegati per il materiale, è stato possibile determinare che la sovrastima media è di 3.6 % se il rivestimento del sensore è *Zynolite* e 27.9 % se il sensore è dotato di rivestimento in grafite colloidale. Pertanto, per tenere conto di questo aspetto, gli autori suggeriscono di moltiplicare la costante di calibrazione fornita dal costruttore che relaziona il segnale in tensione con il flusso termico per un fattore correttivo pari a 0.965 nel caso della *Zynolite* e di 0.782 nel caso della grafite colloidale.

Per ovviare a questo problema, Ballestrin *et al.* (2006) hanno proposto un metodo di calibrazione alternativo applicata a sensori di tipo Gardon con sistema di raffreddamento attivo ad acqua e basato sul bilancio termico. Infatti, il sensore è costituito in gran parte da rame, materiale con eccellenti proprietà di conduzione termica e può essere utilizzato come calorimetro, con una costante di tempo di circa 1 s. In questo metodo, si prevede di determinare il flusso termico assorbito dalla faccia frontale del sensore attraverso la misura della potenza termica trasferita al fluido di raffreddamento. La prima importante peculiarità di questo metodo è che, una volta stabilita la portata di massa che scorre nel circuito di raffreddamento del sensore e lavorando in modo tale da mantenere la variazione di temperatura del fluido di raffreddamento entro pochi gradi centigradi, il segnale di output è associato al flusso termico assorbito, indipendentemente dallo spettro di emissione della sorgente termica e dall'assorbimento spettrale del rivestimento utilizzato. Quindi, la potenza termica assorbita dallo strumento è determinata dalla misura della differenza di temperatura, può essere riportato al flusso solare incidente semplicemente dividendola per l'area della superficie frontale dello strumento e per il coefficiente di assorbimento del rivestimento calcolato nel *range* di lunghezze d'onda dello spettro solare, cioè tra 0.3 μm e 2.5 μm circa.

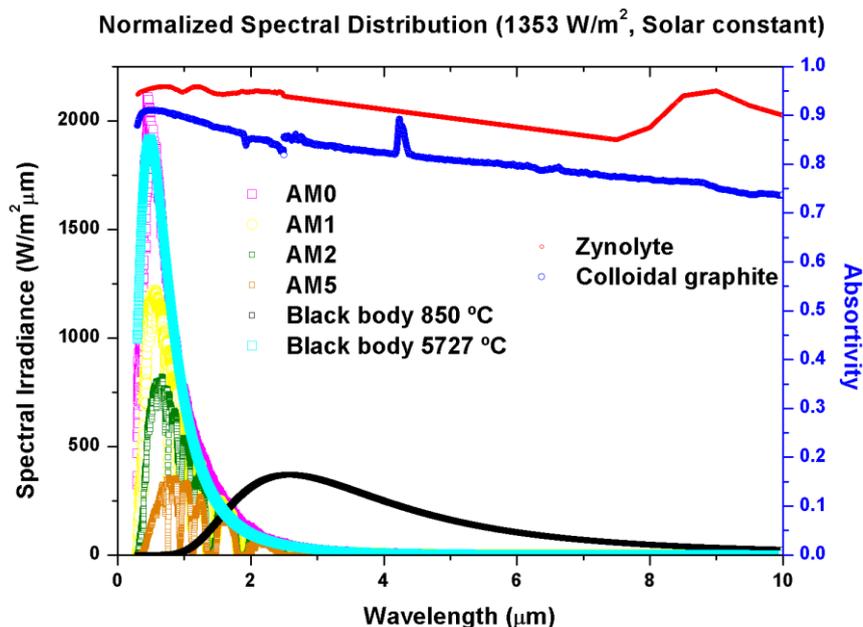


Figura 11 – Spettri di radiazione solare a diversi valori della massa d'aria (AM), spettro di irradianza di due corpi neri a temperatura di 850°C e 5727°C e coefficiente di assorbimento emisferico spettrale di due rivestimenti utilizzati a copertura della faccia frontale di radiometri di Gardon o di microsensori di flusso termico (Ballestrín *et al.* 2003).

Per la calibrazione con il metodo calorimetrico, viene impiegata una fornace dotata di una piastra rettangolare in grafite che irradia una potenza termica proporzionale all'intensità della corrente elettrica che la attraversa. Il sensore è alloggiato all'interno di un guscio in acciaio inossidabile riempito con isolante termico. La differenza di temperatura tra uscita ed ingresso del circuito di raffreddamento del sensore viene misurata contemporaneamente da una termocoppia e da due termoresistenze *Pt100*. Una seconda termocoppia è utilizzata per la misura della temperatura dell'isolante elettrico. Una volta stabilizzata la temperatura della piastra, misurata da un pirometro, il sensore viene rapidamente portato vicino alla piastra, ad una distanza tale da minimizzare l'influenza di effetti convettivi e viene mantenuto in tale posizione per pochi secondi. Poi viene fatto raffreddare prima di ripetere la procedura a diversi livelli di temperatura. Si tiene conto degli effetti di conduzione termica tra l'isolamento e il sensore. I risultati evidenziano che la costante di calibrazione determinata con il metodo calorimetrico ricade all'interno della banda di errore rispetto a quella determinata con il metodo di calibrazione classico e corretta per applicazioni in collettori solari a concentrazione come descritto in precedenza. Il grande vantaggio della procedura calorimetrica di calibrazione è che, utilizzando una opportuna portata di massa per il fluido di raffreddamento, l'incertezza dello strumento si riduce a $\pm 2\%$, mentre il limite principale è dato dal limite massimo di validità per flussi termici di 100 kW m^{-2} .

I microsensori di flusso termico (Hager *et al.* 1991) sono dotati di una termopila realizzata attraverso la tecnologia di *sputtering* di film sottili. La termopila in genere è realizzata utilizzando la coppia termoelettrica rame-costantina e viene utilizzata per misurare la differenza di temperatura attraverso un sottilissimo strato, sempre realizzato per *sputtering* di monossido di silicio oppure di nitrato di alluminio che funge da resistenza termica. Il sensore è in grado di misurare flussi termici trasmessi mediante tutti e tre i meccanismi di trasmissione del calore, conduzione, convezione ed irraggiamento. A seconda delle applicazioni, la faccia dello strumento esposta al flusso termico può essere dotata di un rivestimento ad elevato coefficiente di assorbimento, come quelli impiegati nei radiometri di Gardon. Nel complesso, l'intero sensore ha uno spessore inferiore ai $2 \mu\text{m}$, pertanto la costante di tempo è molto bassa ($300 \mu\text{s}$ per sensori dotati di rivestimento ad alto coefficiente di assorbimento). Questo implica la possibilità di ottenere una mappatura del flusso solare concentrato in un intervallo di tempo molto minore rispetto a quanto si

potrebbe ottenere con un i radiometri di Gardon. Questo è vero a patto di avere un sistema di acquisizione dati in grado di garantire una adeguata frequenza di campionamento. I microsensori di flusso termico possono lavorare con temperature della faccia frontale fino a 800°C e senza sistema di raffreddamento. Il loro *range* di misura del flusso termico si estende a partire da 1 kW m⁻² senza nessun limite massimo se non quello imposto dai materiali. Dal momento che la conduttività termica dello strato che funge da resistenza termica varia in funzione della temperatura, nello strumento è integrato un sensore di misura della temperatura. Questo può essere una termocoppia o una termoresistenza a film sottile di platino. Nel certificato di calibrazione, viene indicato come tenere conto della variazione della conduttività termica dello strato in monossido di silicio durante la misura del flusso concentrato. La misura della temperatura è inoltre molto utile per valutare l'effetto delle dissipazioni termiche. Esistono versioni di microsensori dotate di sistema di raffreddamento attivo e di finestra per eliminare completamente l'influenza della convezione termica a spese di un minore angolo di accettazione. La procedura di calibrazione è analoga a quella descritta per i radiometri di Gardon, e l'accuratezza dichiarata dal costruttore è di $\pm 3\%$.

Microsensori di flusso termico non raffreddati ad acqua sono stati utilizzati per costruire un sistema ibrido per la mappatura del flusso solare concentrato di un campo di eliostati sull'area di apertura del prototipo di ricevitore volumetrico *Hitrec II* montato sulla torre *SSPS-CRS* presso la piattaforma solare di Almeria (Ballestrin 2002; Ballestrín and Monterreal 2004). Il sistema di misura considerato è ibrido perché oltre al sistema di misura diretto, è compresente un sistema basato su una tecnica di misura del flusso indiretta. Il ricevitore volumetrico sopra citato ha un'altezza di 80 cm ed una larghezza di 60 cm. I microsensori sono alloggiati in una barra mobile verticale in acciaio e sono distribuiti in maniera tale da essere più vicini nella porzione centrale della barra, così da investigare meglio la regione in cui ci si aspetta il picco del flusso concentrato. La distanza media dei sensori lungo la barra verticale è di 100 mm. La barra è montata su un sistema rotante che si muove all'interno di un piano parallelo al ricevitore e posto ad una distanza di 250 mm da esso. Il perno del sistema rotante è posto sotto al ricevitore, lungo il suo asse di simmetria. Come si vede in Figura 12, la barra dei sensori si trova posizionata a 535 mm dall'asse di rotazione, a lato di una piastra bianca che è parte del sistema indiretto di misura. Inoltre sono visibili due piccole aste verticali, poste a lato dell'area di apertura del ricevitore e denominate dagli autori "*hot fingers*". La loro funzione è quella di permettere il calcolo della velocità di rotazione della barra. Infatti, queste aste, che formano un angolo di 18.4° con l'asse di rotazione, coprono il sensore posizionato più in basso causando dei minimi locali nell'andamento temporale del segnale di uscita di tale sensore. L'intervallo temporale così individuato permette di scegliere i dati utili ottenuti dai sensori per la mappatura del flusso solare nella regione di interesse. La velocità del sistema rotante durante le prove sperimentali è di 0.21 rad s⁻¹ e utilizza una frequenza di acquisizione di 40 dati al secondo. Questo porta ad avere una risoluzione spaziale nella direzione orizzontale tra 10 mm e 13 mm. Tale risoluzione può essere aumentata, riducendo la velocità di rotazione del sistema o aumentando la frequenza di campionamento dei dati sperimentali. I dati misurati ogni volta che il sistema rotante scansiona l'area di apertura del ricevitore sono circa 300 e non permettono una stima affidabile della distribuzione del flusso solare concentrato e del suo valore totale. Per questo motivo, viene effettuata un'interpolazione con il metodo delle distanze inverse, per la stima dei valori di flusso ad intervalli spaziali di 10 mm lungo le due direzioni. I risultati riportano che l'incertezza sulla misura della potenza termica totale sul ricevitore è dovuta alle incertezze nella posizione dei sensori e della barra. L'incertezza totale è data dalla combinazione dell'incertezza di posizione con quella di elaborazione dei dati (interpolazione e integrazione) ed è pari a $\pm 6\%$.

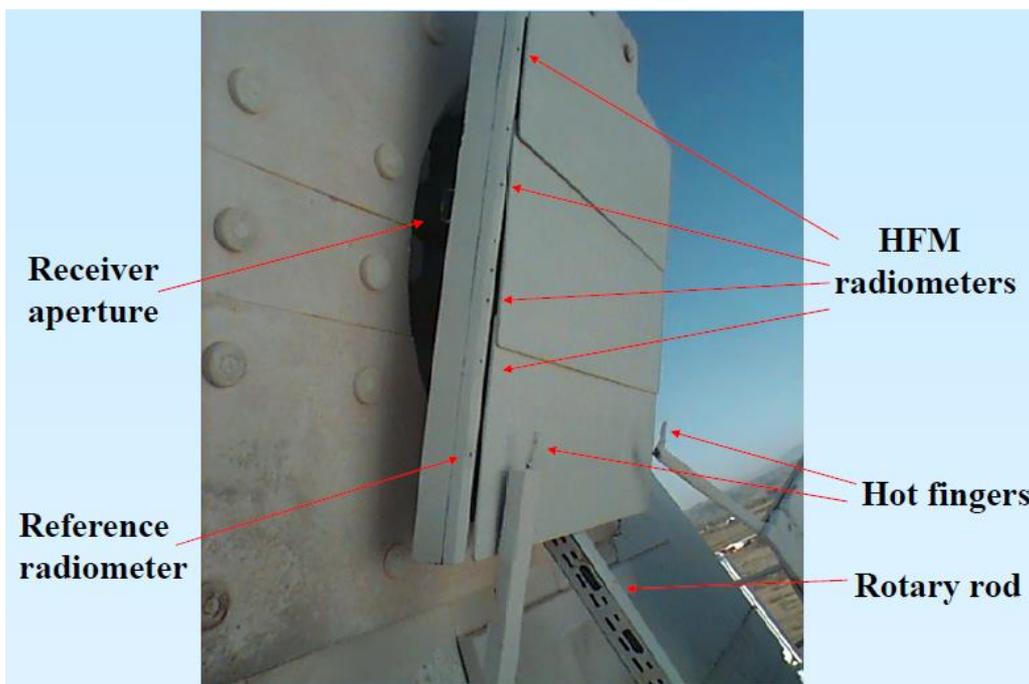


Figura 12 – Sistema ibrido per la mappatura del flusso concentrato sulla superficie di apertura del ricevitore volumetrico Hitrec II installato sulla torre SSPS-CRS di uno sei campi di eliostati presso la Piattaforma Solare di Almeria (Ballestrin 2002)

3.1.2 Radiometri con fotosensori

Nella maggior parte dei casi, nei radiometri con fotosensori, l'elemento sensibile è un fotodiodo che produce una corrente elettrica proporzionale al flusso di fotoni incidenti sulla superficie, la cui intensità dipende dai materiali semiconduttori di cui è costituito. Vi sono esempi in letteratura in cui sono utilizzate celle fotovoltaiche come elementi sensibili.

In generale, i fotosensori hanno un limite massimo di flusso termico a cui possono essere sottoposti, perciò, se utilizzati per la mappatura del flusso solare in collettori ad alto rapporto di concentrazione, richiedono un sistema di attenuazione del flusso termico che li investe. La sensibilità di questi sensori è dipendente dall'effettiva distribuzione dell'irradianza solare in funzione della lunghezza d'onda. Lo spettro solare varia nell'arco di una giornata in base alla posizione del sole nella volta celeste e alla composizione dell'atmosfera, in particolare alla presenza di *aerosol*. Vale la pena ricordare che lo spessore di atmosfera che i raggi solari devono attraversare ha un massimo all'alba e al tramonto e minimo in corrispondenza del mezzogiorno solare.

A differenza dei fotodiodi e delle celle fotovoltaiche, i rilevatori piroelettrici hanno una risposta più uniforme al variare della distribuzione d'irradiazione spettrale del flusso incidente, ma presentano una sensibilità molto bassa e perciò generalmente non vengono utilizzati per misure in collettori solari a concentrazione.

Malgrado la bassa sensibilità il limite massimo di flusso termico a cui possono essere sottoposti, i fotosensori presentano caratteristiche decisamente interessanti e vantaggiose: un tempo di risposta molto breve, un'eccellente linearità del segnale di output rispetto al flusso in ingresso da misurare ed un costo molto contenuto.

Per superare i limiti e sfruttare i vantaggi associati ai fotosensori, alcuni ricercatori hanno proposto l'applicazione di questi sensori all'interno di sfere integratrici per realizzare strumenti di misura e mappatura del flusso solare concentrato. Una sfera integratrice è un dispositivo ottico costituito da una sfera cava, la cui superficie interna è dotata di un rivestimento caratterizzato da un coefficiente di riflessione diffusa tra 0.98 e 0.99. La radiazione che deve essere misurata, entra attraverso un'apertura di

area nota ed è presente una seconda apertura, in corrispondenza della quale è alloggiato l'elemento sensibile (Figura 13).

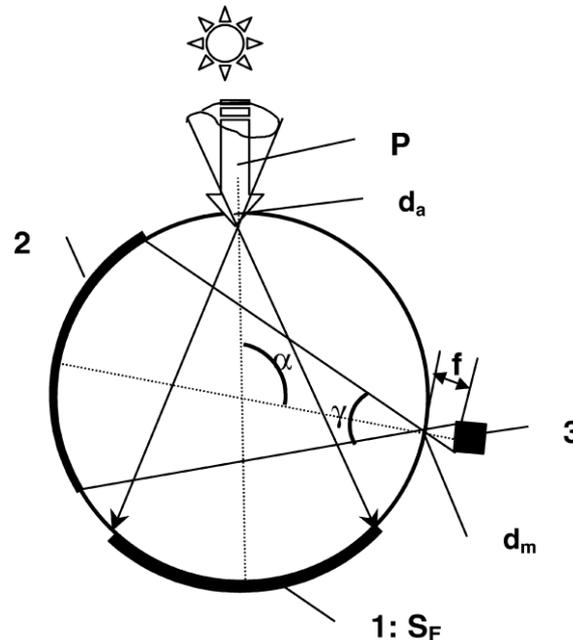


Figura 13– Rappresentazione schematica di uno strumento per la misura del flusso solare concentrato costituito da un fotosensore installato in una sfera integratrice: (1): area di primo impatto; (2) area di misura; (3) fotosensore (Ferriere and Rivoire 2002).

I fotoni che entrano nella sfera in un certo istante colpiscono una parte della superficie interna, detta area di primo impatto, e vengono riflessi in maniera diffusa dallo speciale rivestimento. Quindi i fotoni vengono riflessi in maniera iterativa da tutti gli altri punti della sfera situati al di fuori della zona di primo impatto. Ad ogni successiva riflessione, una piccola parte dei fotoni viene assorbita e i fotoni vengono idealmente completamente assorbiti dopo un numero infinito di riflessioni. Tali considerazioni valgono anche per i fotoni che entrano nella sfera integratrice all'istante di tempo immediatamente successivo. Al passare del tempo, l'intensità di emissione di ciascuno dei punti della superficie interna è la somma di tutte le intensità di emissione occorse fino a quell'istante. L'intensità di emissione della superficie interna della sfera al di fuori dell'area di primo impatto ha un andamento asintotico verso un valore proporzionale al flusso termico incidente sullo strumento. È fondamentale che il fotosensore riceva una potenza termica sufficientemente alta per poter essere misurata, ma allo stesso tempo deve essere evitato che il fotosensore sia esposto direttamente al flusso termico entrante o che rilevi anche l'intensità di emissione proveniente dall'area di primo impatto. Il tempo necessario a far sì che l'intensità di emissione della superficie interna della sfera (esclusa l'area di primo impatto) raggiunga un valore molto prossimo a quello che si raggiungerebbe dopo un numero infinito di riflessioni isotropiche, dipende dalle dimensioni geometriche della sfera. Tipicamente per una sfera integratrice con un diametro di 10 mm, il tempo di risposta dello strumento intorno a 8 ns. La configurazione di questo strumento permette di effettuare la misura del flusso indipendente dall'angolo di incidenza medio dei raggi. Questa caratteristica è particolarmente interessante per applicazioni in collettori solari con ricevitori non piani o inclinati. Ferriere e Rivoire (2002) hanno esplicitato la relazione che lega l'intensità di emissione dei punti della superficie interna di una sfera integratrice al flusso termico incidente attraverso un modello di riflessione multipla di fotoni. Hanno definito inoltre le linee guida per l'ottimizzazione di uno strumento per la misura del flusso solare concentrato basato sull'utilizzo di una sfera integratrice e di un fotosensore e proponendo un uso pratico di tale strumento per applicazioni in fornaci solari. I parametri di maggiore influenza nell'ottimizzazione di uno strumento di questo tipo sono il diametro della sfera, il diametro dell'apertura di ingresso del flusso incidente, il diametro dell'apertura dell'uscita posta in corrispondenza del fotosensore ed il posizionamento del sensore stesso. A valle dell'analisi condotta, Ferriere e Rivoire (2002) hanno progettato un misuratore di flusso solare concentrato nel *range* compreso fra 2000 kW m^{-2} e 18000 kW m^{-2} con un angolo di vista di 160° circa. La sfera

integratrice ha un diametro di 10 mm, l'area di ingresso e l'apertura di uscita per il fotosensore hanno un diametro di 0.5 mm. Il fotosensore utilizzato è un rivelatore in silicio che produce 5 A W^{-1} . Lo strumento include un amplificatore del segnale in uscita. Per permettere allo strumento di essere esposto a flussi solari particolarmente elevati e per impedire l'eccessivo surriscaldamento del sensore di silicio, il corpo dello strumento è raffreddato ad acqua. Lo strumento è molto compatto e permette un'alta risoluzione spaziale nella determinazione della mappatura del flusso solare concentrato. Secondo gli autori, il principale limite dello strumento è la facilità con cui le proprietà di riflessione diffusa del rivestimento interno della sfera si degradano a seguito della continua esposizione al vapore d'acqua. Per questa ragione, la rimozione e la sostituzione del rivestimento deve essere frequente ed è necessario monitorare spesso l'accuratezza dello strumento tramite una calibrazione fatta per comparazione con uno strumento di riferimento. Il fotosensore interfacciato con la sfera integratrice realizzato da questi autori permette di raggiungere un'accuratezza nella misura del flusso concentrato di $\pm 5\%$.

Parretta *et al.* (2007) hanno proposto un radiometro a doppia cavità che costituisce un'evoluzione del misuratore di flusso solare descritto da Ferriere e Rivoire (2002). Questo radiometro può trovare applicazione in un qualsiasi collettore solare a concentrazione, sia esso fotovoltaico oppure termico. Lo strumento in questione è composto da due cavità ottiche interconnesse fra di loro che fungono da sfere integratrici (

Figura 14). La prima cavità è provvista di un'apertura investita dal flusso termico da misurare. La seconda cavità è connessa alla prima tramite un'apertura intermedia. Quest'ultima presenta altre due aperture per la misura del flusso concentrato tramite fotosensore e per la definizione della distribuzione dell'intensità spettrale del flusso incidente tramite una fibra ottica collegata ad uno spettrografo. La presenza di uno spettrografo consente di tenere conto della sensibilità dell'elemento sensore alla variazione della radiazione spettrale del flusso incidente. Per garantire una completa integrazione ed omogeneizzazione dell'intensità di emissione della superficie interna della seconda sfera sono presenti tre schermi. Il primo impedisce che parte del flusso termico incidente raggiunga direttamente la seconda sfera integratrice, mentre gli altri due impediscono che l'irradiazione riflessa dalla prima sfera raggiunga direttamente il fotosensore o la fibra ottica connessa allo spettrografo senza essere prima ulteriormente riflessa dalla seconda sfera. In questo modo, è ragionevole aspettarsi che la distribuzione della radiazione all'interno della seconda sfera sia uniforme ed indipendente dall'angolo di incidenza del flusso in ingresso. L'irradiazione entrante subisce una prima attenuazione all'interno della prima sfera integratrice ed una seconda attenuazione nella seconda cavità. Il fattore di attenuazione complessivo è funzione delle aree delle aperture di ingresso e di interconnessione. L'utilizzo di una serie di inserti che permettono di variare le aree di apertura di ingresso e di interconnessione, consente di avere un fattore di attenuazione regolabile in base all'intensità del flusso. In questo modo l'irradiazione che raggiunge il fotosensore, sarà pressoché sempre la stessa e diviene possibile utilizzare lo strumento per misurare flussi solari da un sole fino a migliaia di soli. Inoltre, variando l'area di ingresso, è possibile misurare la potenza termica incidente su di una piccola area (ad esempio una cella fotovoltaica) o determinare la mappa di flusso solare concentrato con elevata risoluzione spaziale. Implementando un sistema di termoregolazione del fotosensore, si riesce a mantenere costante la sensibilità dello strumento.

Parretta *et al.* (2007), considerando di applicare il radiometro a doppia cavità ad un collettore a concentrazione fotovoltaico esistente, hanno sviluppato un modello ottico analitico seguito da uno studio basato su un codice di *ray-tracing* ed un modello termico del radiometro a doppia cavità. In particolare, il modello è stato sviluppato nell'ipotesi di utilizzare lo strumento per la misura della potenza termica che raggiunge una cella fotovoltaica a seguito della concentrazione della radiazione solare diretta tramite una lente di Fresnel. In questo radiometro, l'elemento sensibile è una delle celle fotovoltaiche impiegate nel collettore solare stesso. Il modello ottico analitico semplificato è utilizzato per esplicitare la dipendenza del fattore di attenuazione dalle aree di apertura di ingresso e di interconnessione. Il modello ottico ottenuto tramite software di *ray-tracing* con la geometria effettiva è stato utilizzato per stimare il fattore di attenuazione con maggiore precisione e per verificare che la presenza della seconda cavità integratrice portasse ad avere una più uniforme distribuzione dell'irradiazione e una minore dipendenza della risposta

dall'angolo di incidenza del flusso incidente rispetto al radiometro a sfera singola. Infine, il modello termico è servito per dimensionare il sistema di termoregolazione del fotosensore tramite celle Peltier.

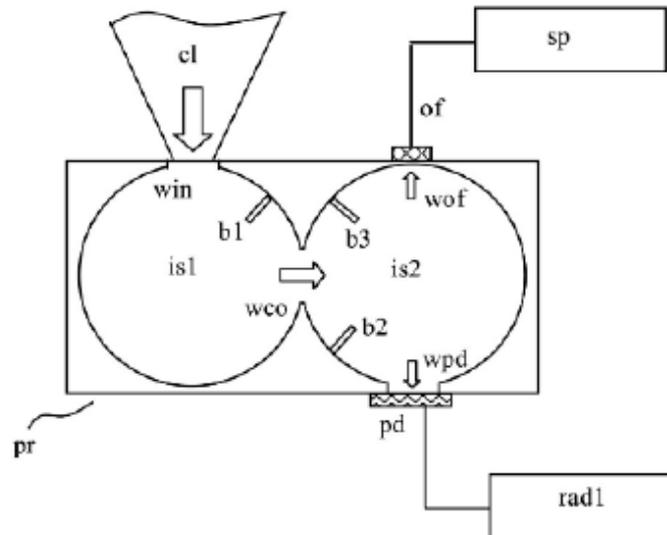


Figura 14– Rappresentazione schematica di un radiometro a doppia cavità costituito da due sfere integratrici interconnesse e dotate di un fotosensore e di uno spettrometro (Parretta *et al.* 2007).

I risultati hanno portato alla realizzazione di un prototipo di radiometro a doppia cavità. La calibrazione del radiometro è stata effettuata utilizzando un simulatore solare a cui è stata aggiunta una lente di Fresnel in modo da ottenere un flusso concentrato fino a 200 volte su un'area grosso modo corrispondente a quella di una cella fotovoltaica (1 cm^2). Il segnale in uscita del radiometro è stato confrontato con quello di una cella di riferimento (dello stesso tipo di quella costituente l'elemento sensibile del radiometro). Grazie a questa procedura di calibrazione, è stato possibile validare i modelli ottici.

Fernández-Reche *et al.* (2008) hanno condotto test sperimentali per confrontare due sistemi per la misura del flusso concentrato in una fornace solare termodinamica: il primo basato sui radiometri di Gardon e il secondo realizzato con celle fotovoltaiche in arseniuro di gallio (*GaAs*). Tali celle fotovoltaiche sono state selezionate perché presentano una risposta molto rapida e una grande linearità quando sono sottoposte alla radiazione solare concentrata. La calibrazione delle celle fotovoltaiche in arseniuro di gallio viene svolta mediante l'utilizzo di una lampada allo xenon e di speciali filtri ottici in un simulatore solare in grado di produrre uno spettro di radiazione molto simile a quello solare con massa d'aria *AM* di 1.5 all'interno del *range* di lunghezze d'onda corrispondente alla risposta spettrale della cella (tra 320 nm e 940 nm). Entrambi i sensori sono adeguatamente raffreddati e i test sono effettuati al mezzogiorno solare. I risultati sperimentali mostrano un buon accordo tra i due sistemi di misura. Gli autori precisano che l'utilizzo delle celle fotovoltaiche come sensori di misura del flusso concentrato in condizioni spettrali diverse rispetto a quelle associate ad una massa d'aria *AM* pari a 1.5 richiede l'implementazione di uno spettrometro nel sistema di misura e per la determinazione di un coefficiente correttivo da applicare ai dati raccolti.

Riffelmann *et al.* (2006) hanno realizzato un sistema per la misura diretta del flusso concentrato lungo il ricevitore parabolico di un impianto a collettori solari parabolici a concentrazione lineare con larghezza di apertura pari a 5.76 m costituito da più moduli. Per ciascuno modulo sono installati 3 ricevitori tubolari da 4 m ciascuno. Il sistema di misura denominato *PARASCAN* consiste di due supporti di forma approssimativamente semicircolare, in ciascuno dei quali sono alloggiati 96 fotodiodi come mostrato in Figura 15. I fotosensori sono a loro volta installati dietro ad elementi translucidi con trasmissione di tipo lambertiano. Il primo supporto è posizionato davanti al ricevitore tubolare e registra tutti i raggi solari riflessi dall'ottica primaria (cilindro parabolico). Il secondo supporto, situato dietro al ricevitore, rileva tutti i

raggi che non colpiscono il ricevitore e che determinano perdite di tipo ottico del collettore solare a concentrazione. I due supporti sono fissati su un carrello scorrevole movimentato attraverso un controllo remoto ed in grado di scansionare la lunghezza di un tubo ricevitore (4 m) in 20 s. In questo modo si ottengono due mappe di flusso: una è riferita radiazione totale riflessa, l'altra alla radiazione dispersa. Dall'integrazione delle due mappe di flusso è possibile calcolare il fattore di intercettazione. Fenomeni di riflessione che possono interessare i raggi che non colpiscono il ricevitore e che vengono registrati dal supporto posteriore possono essere fonte di errore sulla misura del flusso concentrato e sulla mappatura del flusso solare concentrato.

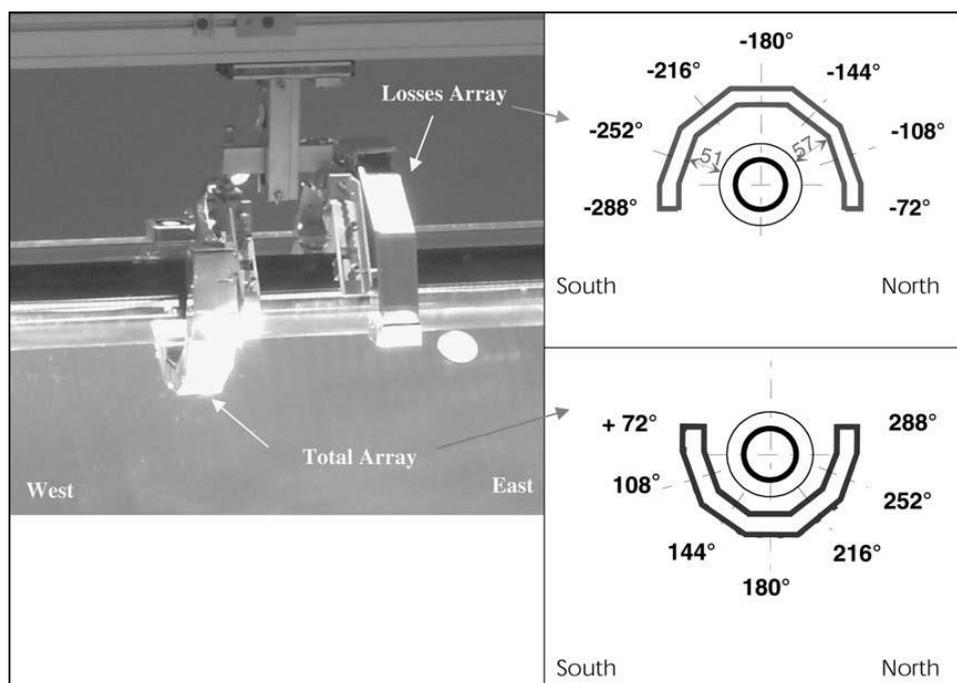


Figura 15 – Sistema di misura del flusso solare concentrato PARASCAN (Rifflemann *et al.* 2006)

3.1.3 Calorimetri

Un calorimetro è un dispositivo utilizzato per la determinazione del flusso termico tramite la misura del calore trasferito ad un fluido vettore che lo attraversa. Questo tipo di dispositivi può essere posizionato direttamente nella regione di concentrazione del flusso solare. Un calorimetro per la misura di un flusso solare si compone principalmente di un elemento ricevente raffreddato a mediante un fluido, in genere acqua. Il fluido di raffreddamento a contatto con l'elemento ricevente defluisce attraverso il dispositivo riscaldandosi. Dalla stima dell'incremento dell'entalpia del fluido, attraverso un bilancio termico, è possibile stimare l'intensità media del flusso solare che investe l'elemento ricevente. In genere l'apertura della cavità ha dimensioni piuttosto ampie ma vi sono anche dispositivi dalle dimensioni più contenute in grado di fornire una risoluzione spaziale più fine.

Uno dei principali vantaggi che caratterizza un calorimetro è il fatto che se ben progettato, non è soggetto ad alcun limite pratico in termini di radiazione concentrata incidente (Estrada *et al.* 2007).

La geometria più semplice di un calorimetro per la misura di un flusso radiativo prevede l'uso di un ricevitore piano raffreddato dal deflusso di un fluido. La Figura 16 riporta lo schema del dispositivo presentato da Estrada *et al.* (2007). Il corpo esterno del ricevitore è realizzato in acciaio inossidabile AISI 316 e presenta due condotti cilindrici concentrici. Alla base di questi si trova una piastra piana in acciaio dello spessore di 5 mm la quale funge da ricevitore. Un distributore in acciaio è inserito all'interno al fine facilitare il deflusso dell'acqua e raffreddare efficacemente la piastra di ricezione del flusso concentrato.

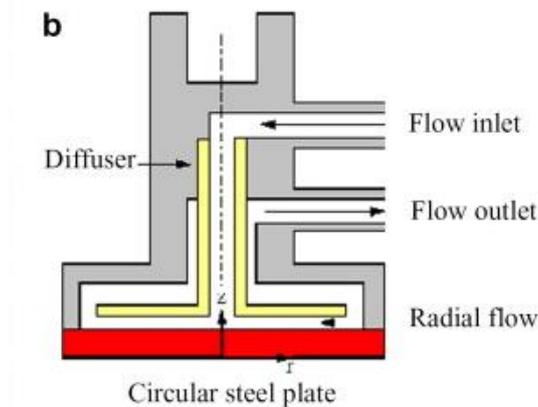


Figura 16 – Struttura di un calorimetro con ricevitore a piastra (Estrada *et al.* 2007).

Rispetto a questo esempio esistono calorimetri che presentano materiali e geometria ottimizzati, in cui, tipicamente, è ricavata una cavità in grado di intrappolare la radiazione che la investe. Idealmente questa cavità dovrebbe mostrare un comportamento da corpo nero. All'interno di questa cavità è posizionato l'elemento ricevente che viene investito dalla radiazione proveniente dall'ottica di concentrazione a meno delle piccole perdite ottiche connesse ai fenomeni di riflessione interna. Un esempio di geometria ottimizzata è rappresentato dal calorimetro a doppio cono *CAVICAL* presentato da Perez-Ràbago *et al.* (2006). Questa tipologia di dispositivo si comporta come uno scambiatore conico raffreddato ad acqua.



Figura 17 - Calorimetro con ricevitore a piastra presentato da Estrada *et al.* (2007).

Figura 18 è rappresentato uno schema rappresentativo dell'unità calorimetrica *CAVICAL*. La superficie interna ricevente è costituita da un cono in rame dello spessore di 3 mm. Il cono presenta un angolo di vertice di 15°, un'altezza di 160 mm e una superficie circolare di base con diametro di 85,7 mm sulla quale è ricavata un'apertura di 32,4 mm. La parete esterna spessa 8 mm è in acciaio inossidabile. Questa parete è esternamente isolata per minimizzare le perdite verso l'ambiente esterno. Fra le due pareti scorre acqua. Attraverso uno studio numerico di *Monte Carlo Ray-Tracing* è stato stimato che questa geometria permette al 98% del flusso termico in ingresso alla cavità di essere assorbito dall'elemento ricevente. La frazione di radiazione concentrata non assorbita viene riflessa dalla cavità stessa. Con questo dispositivo è possibile misurare flussi solari con concentrazioni fra i 50 e i 2000 soli.

Un altro esempio di calorimetro a doppio cono è rappresentato dal calorimetro *SunCatch* sviluppato nell'istituto *DLR* di Colonia e dal successivo *SunCatch II*. Questi dispositivi presentano un cono spesso in rame all'interno di cui sono ricavati dei condotti per il raffreddamento, come rappresentato in Figura 19. Groer *et al.* (1999) hanno mostrato come per questo dispositivo l'accuratezza della misura sia inversamente

proporzionale all'intensità del flusso incidente: a 5000 soli l'errore ottenuto è pari a $\pm 0.5\%$ mentre è di $\pm 1\%$ a 1000 soli, per poi crescere ulteriormente al diminuire del rapporto di concentrazione.

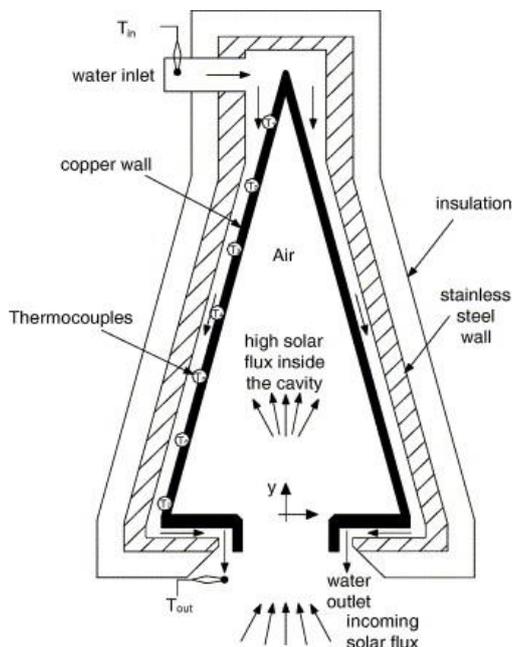


Figura 18 – Rappresentazione schematica del calorimetro CAVICAL (Perez-Rabago, 2006).

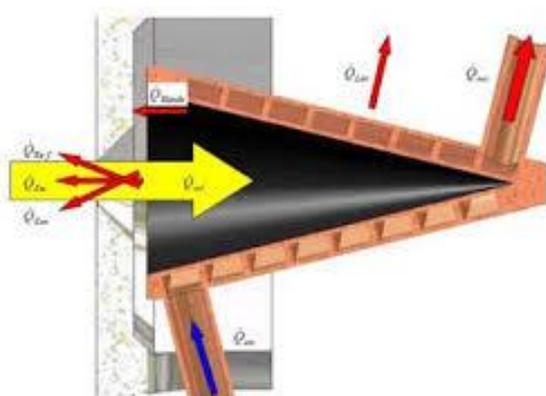


Figura 19 – Schema di principio del calorimetro SunCatch (DLR Colonia).

3.2 Metodi indiretti per la misura del flusso concentrato

Nei metodi indiretti sono compresi tutti quei sistemi di misura del flusso termico che non vengono posti direttamente nella regione di concentrazione, ma la misura del flusso concentrato viene eseguita da una certa distanza. Tipicamente si impiegano camere ad accoppiamento di carica (CCD - charge coupled device) dotate di opportuni filtri adatti per la visualizzazione di immagini del flusso solare concentrato su obiettivi collocati nella regione focale o nelle sue immediate vicinanze (nel caso di campi ad eliostati con ricevitore centrale). L'impiego delle camere CCD è giustificato dall'elevata qualità del segnale e dalla linearità della loro risposta. Le immagini raccolte attraverso questa metodologia devono essere elaborate e permettono di visualizzare in scala di grigi la distribuzione dell'intensità relativa del flusso termico sul profilo dell'obiettivo impiegato. In altre parole, le immagini forniscono la forma qualitativa della distribuzione del flusso solare concentrato. Per avere informazioni quantitative, è necessario calibrare il sistema di misura composto da camera ed obiettivo, in maniera tale da correlare ciascuna sfumatura della scala di grigio ad un valore fisico di flusso solare concentrato. La calibrazione avviene molto spesso per mezzo di un sensore

di misura diretto, come ad esempio un microsensore di flusso termico o un radiometro di Gardon. Per applicazioni in concentratori solari è anche possibile calibrare la camera *CCD* attraverso la registrazione dell'immagine del disco solare e la contemporanea misura dell'irradianza normale diretta tramite un pireliometro.

Nella maggior parte dei lavori disponibili in letteratura, i materiali adottati per l'obiettivo da porre nella regione di concentrazione sono tali da poter assumere una riflessione lambertiana del flusso solare concentrato nel *range* degli angoli di incidenza in esame. Questa proprietà garantisce una riflessione omogenea ed uniforme a prescindere dall'angolo di osservazione. Il materiale generalmente impiegato per ottenere una diffusione perfettamente uniforme della radiazione incidente è l'allumina. L'utilizzo delle superfici lambertiane in concentratori ad elevato rapporto di concentrazione è problematico, principalmente per l'elevato flusso incidente che può rapidamente danneggiarle. In questi casi, se l'obiettivo è fisso, è necessario progettare ed integrare un sistema di raffreddamento ad acqua oppure adottare sistemi di movimentazione dell'obiettivo (come quelli di Figura 2). Nel secondo caso, si catturano una serie di immagini con la camera *CCD* e la mappatura del flusso solare concentrato viene realizzata a posteriori attraverso l'elaborazione dei dati all'elaboratore. Una soluzione alternativa all'uso di superfici con riflessione lambertiana prevede l'utilizzo di obiettivi in grado di trasmettere con comportamento lambertiano la radiazione incidente a fibre ottiche collegate ad una camera *CCD*. Infine, recentemente è stata proposta una nuova metodologia indiretta in cui la camera *CCD* rileva la distribuzione del flusso concentrato direttamente sulla superficie del ricevitore.

I metodi indiretti sono molto utilizzati in varie tipologie di concentratori solari perché sono molto affidabili e permettono di ottenere una risoluzione spaziale molto elevata in tempi relativamente brevi.

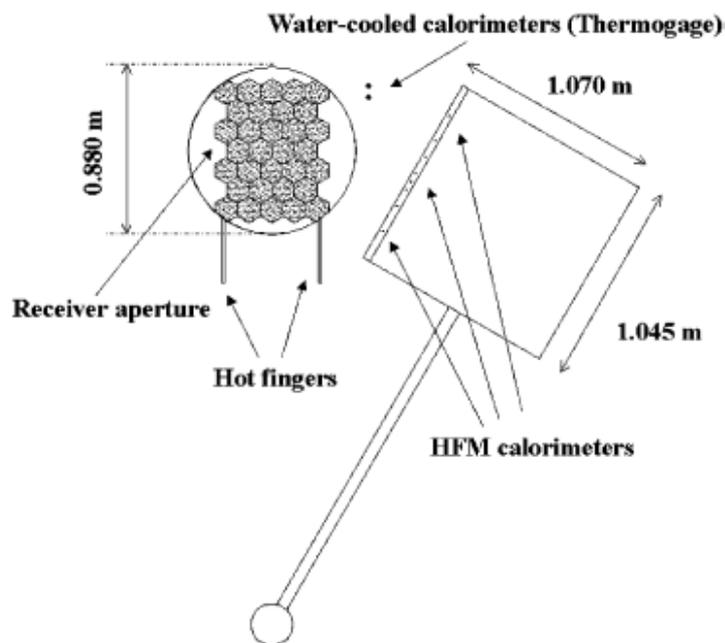


Figura 20 - Sistema ibrido rotante di Ballestrin e Monterreal (2004) costituito da una barra con una serie di microsensori di flusso e da un obiettivo bianco lambertiano su cui vengono catturate immagini della distribuzione del flusso solare concentrato con una camera *CCD*.

Il sistema di misura ibrido per la mappatura solare in un ricevitore centrale di un campo di eliostati presentato da Ballestrin e Monterreal (2004), oltre alla barra rotante dotata di microsensori di flusso termico (Figura 12), presenta un obiettivo bianco lambertiano integrato nello stesso sistema di movimentazione (Figura 20/Figura 26). Una camera *CCD* è utilizzata per catturare le immagini del flusso solare concentrato sull'obiettivo, durante il suo passaggio davanti al ricevitore, nel piano di misura. Per la calibrazione della camera *CCD*, due radiometri di Gardon con sistema di raffreddamento integrato e con

diametro frontale di 25 mm sono collocati molto vicini al piano di misura. I risultati della loro campagna sperimentale dimostrano un ottimo accordo fra metodo diretto ed metodo indiretto utilizzati contemporaneamente per la misura della potenza incidente l'area di apertura del ricevitore. La realizzazione di un sistema ibrido ha consentito inoltre di validare entrambi i metodi e di avere una maggiore confidenza sulle misure condotte. Questa attività sperimentale sottolinea come non esista a priori un sistema ottimale per la mappatura del flusso solare concentrato e come una configurazione adeguata del sistema di misura al tipo di concentratore considerato, sia esso diretto o indiretto, permetta di ottenere ottimi risultati.

Un altro sistema ibrido è stato proposto per la mappatura del flusso solare su un ricevitore tubolare in un concentratore parabolico lineare nel lavoro di Riffelmann *et al.* (2006). Oltre al metodo diretto *PARASCAN* (Figura 15), gli autori hanno utilizzato un obiettivo bianco lambertiano, montato ortogonalmente al ricevitore, sul quale vengono visualizzati i raggi solari riflessi dal concentratore. Una fotocamera digitale calibrata (Figura 21) ha permesso di catturare diverse immagini. L'obiettivo presenta un intaglio per un suo più facile posizionamento sul ricevitore tubolare. L'obiettivo può essere spostato lungo la regione di concentrazione attraverso un braccio telescopico. Questa tecnica di misura risulta molto semplice e flessibile, e permette una rapida individuazione visiva delle perdite ottiche (i raggi che non colpiscono l'assorbitore) e delle zone a maggiore e minore concentrazione. Questo può portare ad una rapida stima qualitativamente del fattore di intercettazione locale, in corrispondenza cioè di una determinata posizione lungo il ricevitore. Per tale stima, è necessario elaborare le immagini catturate includendo le fasi di raddrizzamento delle immagini e di correzione dello sfondo. Ciò si rende necessario per tener conto della radiazione solare diretta che raggiunge una parte del ricevitore tubolare, senza essere riflessa dagli specchi parabolici. Dopo l'elaborazione delle immagini, il calcolo della potenza che raggiunge l'assorbitore e della potenza persa viene fatto integrando il valore del flusso solare concentrato rispettivamente lungo una semicirconferenza posta di fronte all'assorbitore (linea grigia in Figura 21 a destra) ed una semicirconferenza posta dietro all'assorbitore (linea bianca in Figura 21 a destra). La camera digitale utilizzata per questa applicazione non ha una risposta lineare ed è necessaria la sua calibrazione. Questa calibrazione viene effettuata in laboratorio, all'interno di una sfera integratrice, catturando immagini a diversi tempi di esposizione. I risultati ottenuti con i due metodi risultano in buon accordo tra loro. Questo lavoro ha messo in evidenza come l'impiego del metodo indiretto possa essere utilizzato per validare le mappe del flusso solare concentrato ottenute con il più preciso metodo diretto.

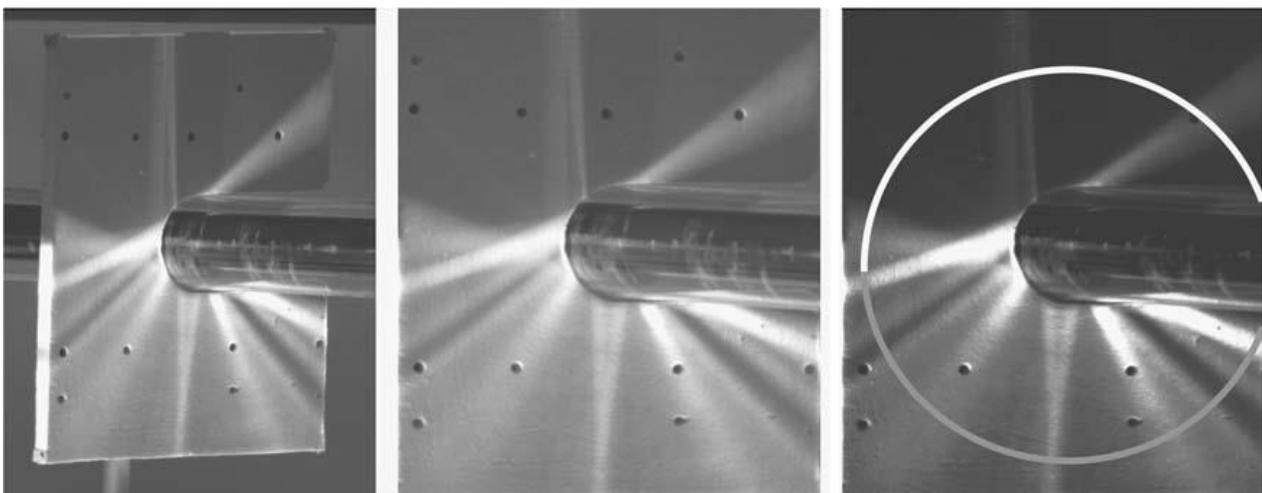


Figura 21 – Metodo indiretto utilizzato sul ricevitore tubolare di un concentratore solare parabolico lineare da Riffelmann *et al.* (2006) e formato da un obiettivo bianco riflettente con comportamento lambertiano. A destra si vedono le linee di riferimento utili al calcolo integrale della potenza che raggiunge l'assorbitore e delle perdite ottiche.

Una seconda versione del sistema mobile *PARASCAN* per la scansione della regione focale (Figura 8) è stata descritta da Lüpfer *et al.* (2006) e da Schiricke *et al.* (2009). In questa seconda versione, sono utilizzate delle fibre ottiche al posto dei fotodiodi per le parti del sensore impiegate per la ricezione della radiazione solare concentrata realizzate in materiale traslucido con comportamento lambertiano e che si trovano di fronte e dietro al ricevitore (Figura 22). Le fibre ottiche sono collocate in 12 segmenti per ciascuna delle due parti del sistema di misura. All'interno di ogni segmento, sono installate 16 fibre ottiche, ad una distanza di 2.5 mm l'una dall'altra. Tutti i segmenti sono collegati ad un fascio contenente 192 fibre ottiche. Questo fascio ha una lunghezza di 10 m e viene installato in maniera tale da poter essere accoppiato con una camera CCD attraverso dei filtri ottici adeguati (Figura 23 e Figura 24).

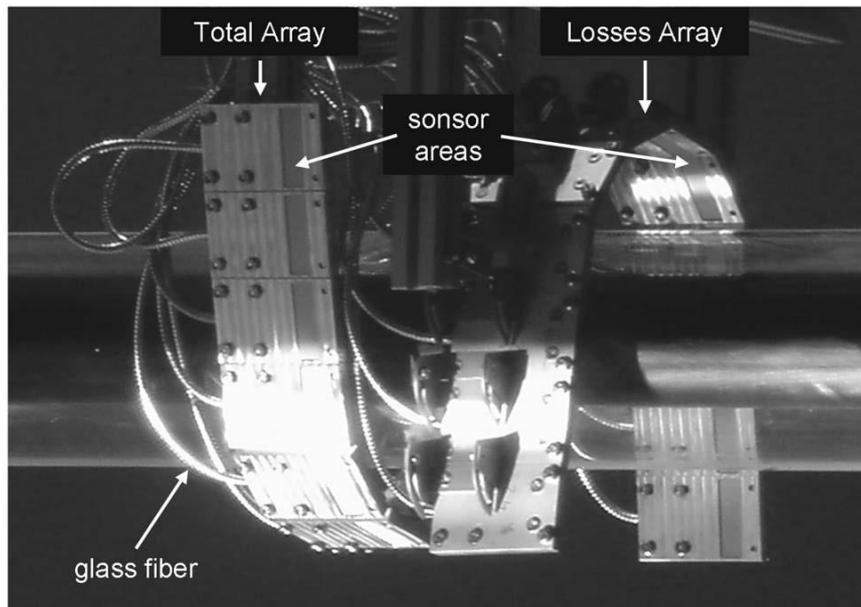


Figura 22 – Seconda versione del sistema di misura del flusso solare concentrato *PARASCAN* con fibre ottiche al posto dei fotodiodi. (Schiricke *et al.* 2009)

Il sistema di misura così realizzato ha una configurazione estremamente flessibile e permette la calibrazione direttamente sotto la luce solare che lo illumina omogeneamente. La flessibilità di questo sistema ne rende possibile l'uso in ricevitori con geometrie diverse. Infine, il ridotto diametro delle fibre ottiche (0.125 mm) rispetto a quello dei fotodiodi (circa 3.5 mm) permette di ottenere una risoluzione ottica risulta molto migliore.

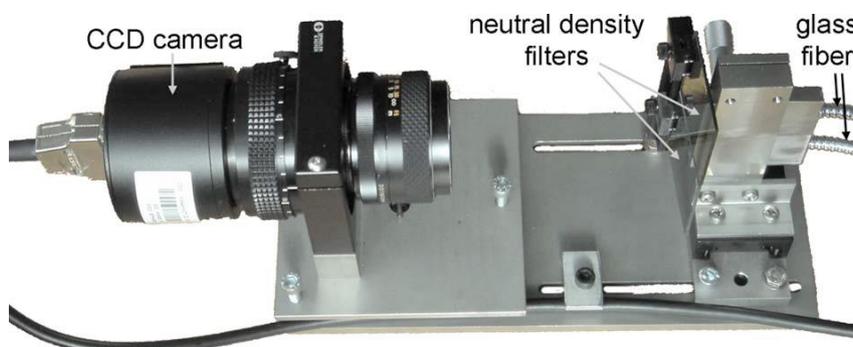


Figura 23 – Camera CCD accoppiata con il fascio di fibre ottiche proveniente dalla seconda versione del sistema *PARASCAN*. (Schiricke *et al.* 2009)

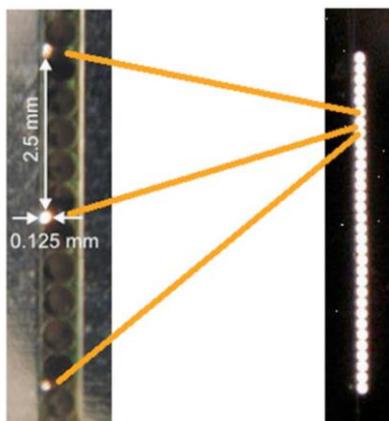


Figura 24– Viste frontali della fibre ottiche nella zona di concentrazione (sinistra) e nella parte del sistema di misura lontana dalla regione di concentrazione in cui si trova la camera CCD. (Lüpfert et al. 2007)

Ho e Khalsa (2012) hanno proposto un nuovo metodo indiretto, detto *PHLUX*, per la mappatura sperimentale del flusso solare su superfici arbitrarie, anche non planari, nella zona focale di concentratori di qualsiasi geometria. Il metodo si basa sull'utilizzo di una camera digitale (*CCD* o *CMOS*), di una immagine digitale del sole con contemporanea lettura dell'irradianza normale diretta tramite pireliometro e del coefficiente di riflessione del ricevitore. A differenza degli altri metodi indiretti sopra descritti, non è previsto l'impiego di un misuratore di flusso termico in prossimità dell'area di apertura del ricevitore per calibrare la camera digitale, né di un obiettivo lambertiano. Nella tecnica proposta, infatti, l'immagine digitale del disco solare è utile per associare il segnale elettrico di tensione associato ad ogni singolo pixel ad un valore di flusso incidente su un'area di ricevitore corrispondente all'area del pixel. Inoltre l'immagine digitale del sole fornisce un riferimento spaziale che quantifica l'angolo sotteso dal ricevitore e le sue dimensioni, tenendo conto degli effetti di prospettiva. Gli autori prevedono inoltre l'uso della superficie del ricevitore stesso per catturare le immagini di flusso concentrato e riportare una metodologia per il calcolo della distribuzione del coefficiente di riflessione sulla superficie del ricevitore. Questa tecnica è stata impiegata per misurare sperimentalmente la distribuzione del flusso solare concentrato sul ricevitore centrale del campo di eliostati presso il *National Solar Thermal Test Facility* dei laboratori Sandia ad Albuquerque, negli Stati Uniti d'America. La parete della torre esposta al campo di eliostati è rivestita con una vernice bianca (Figura 25) e viene assunta a comportamento lambertiano. Durante i test, viene utilizzato un solo eliostato posizionato in maniera tale da centrare l'immagine solare su un radiometro di Gardon raffreddato ad acqua. Questo permette il confronto fra i valori di picco del flusso ottenuti con i due metodi. Dai risultati, si osserva un ottimo accordo fra i valori massimi ottenuti con le due tecniche, entro il 2%.



Figura 25 – Metodo indiretto *PHLUX* applicato al ricevitore centrale posto sulla torre del campo di eliostati nei laboratori Sandia ad Albuquerque. (Ho e Khalsa 2012)

Questo metodo è stato applicato anche da Röger *et al.* (2014) ad un ricevitore centrale presso al *Piattaforma Solare di Almeria*, in Spagna. Ci sono alcuni fattori che vanno esaminati attentamente quando si considera questa tecnica sperimentale. In primo luogo, il ricevitore può essere utilizzato come obiettivo per la misura del flusso se presenta una riflessione diffusa. In genere, considerare che la funzione bidirezionale di distribuzione della riflettanza del ricevitore sia costante è un'ipotesi valida solo per certi angoli di incidenza e per certe posizioni della camera digitale. L'effettiva funzione bidirezionale della riflettanza sulla superficie del ricevitore deve essere quindi caratterizzata in laboratorio attraverso un gonioreflessometro. L'incertezza nella determinazione della riflessione del ricevitore ha un grande peso nell'accuratezza totale del metodo di misura. In secondo luogo, nei metodi indiretti con camera digitale e obiettivo bianco lambertiano, la superficie colpita dal flusso solare concentrato è caratterizzata da un elevato coefficiente di riflessione diffusa ed è mantenuta a temperatura bassa tramite raffreddamento o mediante installazione in un sistema di movimentazione. Quando è il ricevitore stesso ad essere impiegato come obiettivo di misura, si deve considerare che esso è dotato di una vernice ad alto coefficiente di assorbimento e che si trova a una temperatura molto diversa da quella dell'ambiente. Questo comporta la necessità di utilizzare dei filtri per poter distinguere la radiazione riflessa da quella emessa per irraggiamento a lunghezze d'onda maggiori.

Infine, se si utilizzano filtri diversi per catturare l'immagine del disco solare e l'immagine del ricevitore, si possono introdurre degli errori legati alla differenza fra il fattore di attenuazione dichiarato dal costruttore e quello ideale. A causa di tutti questi aspetti, l'errore totale sulla mappatura del flusso solare associato all'utilizzo di questo metodo indiretto può essere molto alta, fino a 20% - 40%.

4 Apparato sperimentale e sistema di acquisizione dati

L'apparato sperimentale utilizzato nel presente lavoro è parte delle strumentazioni disponibili nel *Laboratorio di Conversione dell'Energia Solare*. Il laboratorio è installato sul tetto del *Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova*. L'apparato impiegato per l'attività di ricerca si compone di un elemento ottico, un concentratore parabolico lineare, dotato di un sistema di inseguimento e di un sistema per la misurazione della radiazione concentrata. La Figura 26 riporta un'immagine del concentratore e del sistema di misurazione impiegati per l'analisi del flusso solare concentrato.



Figura 26 – Concentratore sperimentale sul tetto del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova.

L'elemento ottico è un prototipo di concentratore parabolico lineare asimmetrico, il cui profilo descrive una semiparabola. Le misure specifiche della semiparabola che definisce il profilo concentratore sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1 – Dimensioni del concentratore

Altezza della semiparabola	2.86 m
Distanza focale	1.81 m
Lunghezza focale	2.40 m
Angolo di bordo	78.7°
Area di apertura	6.86 m ²

La superficie riflettente del concentratore è costituita da quattro specchi disposti su due file. I materiali adottati e i processi di lavorazione degli specchi garantiscono eccellenti proprietà di riflessione: il costruttore certifica un coefficiente di riflessione nominale della radiazione normale incidente pari a 96.1%. Il concentratore è dotato di un sistema di inseguimento solare a due assi che consente di tracciare il percorso diurno del sole. Questo sistema permette di assicurare la normalità della radiazione incidente (*direct normal irradiance, DNI*) rispetto all'area di apertura del concentratore. In questo modo, durante il funzionamento si evitano perdite causate da un'incidenza non perpendicolare dei raggi solari ed i conseguenti errori nella distribuzione del flusso concentrato (il modificatore dell'angolo di incidenza è unitario). Il sistema di movimentazione dell'inseguitore è gestito da un sistema di controllo che combina l'uso di effemeridi solari al segnale proveniente da un sensore ottico di luminosità. La combinazione dei due sistemi garantisce una precisione di allineamento al di sotto di 0,2°.

Per la misura della radiazione concentrata è stato progettato e realizzato un sistema *ad hoc*. La particolare asimmetria nella semiparabola del concentratore implica che il piano di misura (piano x,z) sia inclinato di 45° rispetto al piano contenente la linea focale e la normale all'area di apertura del concentratore. Sul piano di misura è minimizzato l'angolo di incidenza della radiazione solare concentrata. Il sistema si compone di un sensore e di un impianto semiautomatico di movimentazione su due assi a velocità variabile. Un carrello trasla parallelamente alla lunghezza del concentratore (asse x). Sulla slitta lungo l'asse x è disposto, sul secondo asse di movimentazione (asse z), un attuatore elettrico lineare *slider* in grado di movimentare il sensore di misura sul piano di misura.



Figura 27 – Sistema di movimentazione del sensore e collegamenti del circuito di raffreddamento del sensore.

Le dimensioni della regione di concentrazione sul piano di misura sono state stimate durante le attività di ricerca delle precedenti annualità. Un modello ottico del concentratore è stato implementato attraverso il software commerciale *SolTrace* (National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2012) ed è stato impiegato per simulazioni tipo *Monte Carlo Ray-Tracing* (MCRT). Da questi studi è risultato che il flusso concentrato si distribuisce su di una regione ampia 10 cm circa (sull'asse *z*) che si sviluppa per la lunghezza focale (2.40 m sull'asse *x*). Queste dimensioni sono state confermate da precedenti studi sperimentali sulla caratterizzazione ottica sul medesimo impianto (Bortolato *et al.* 2014).



Figura 28 – Particolare della regione di concentrazione della radiazione riflessa (Bortolato *et al.* 2014).

In base alle simulazioni MCRT e alle misure sperimentali è stato dimensionato il sistema di movimentazione del sensore: il sistema ammette spostamenti orizzontali (asse *x*) lungo 2.40 m, equivalenti alla lunghezza focale del concentratore; lo *slider* verticale (asse *z*) presenta una corsa utile di 15 cm, centrata sulla linea di fuoco.



Figura 29 – Particolare del sensore montato sulla testa dello *slider* verticale (asse *z*).

Il sensore di flusso termico è montato sulla testa dello *slider*, in modo da garantire la copertura di tutta la regione di concentrazione sul piano di misura. Dall'analisi sulle tecnologie disponibili per la misurazione del flusso termico concentrato (vedi Capitolo 4) è stato selezionato il micro-sensore *Vatell HFM-7E/L* (Vatell Corporation 2015). Questa scelta è stata dettata soprattutto dai ridotti tempi di risposta che presentano questo tipo di sensori. Attualmente i sensori *Vatell* della serie *HFM* (Heat Flux Microsensor) presentano un tempo di risposta dichiarato dal costruttore pari a 17 μ s per il modello *HFM-7E/L* senza rivestimento. Le principali caratteristiche del sensore *Vatell HFM-7E/L* sono riportate nella Tabella 2.

Tabella 2 – Caratteristiche del sensore Vatell HFM-7E/L (Vatell Corporation 2015)

Tempo di risposta senza rivestimento (con rivestimento)	17 (300) μs
Sensibilità minima	$150 \mu\text{V W}^{-1} \text{cm}^{-2}$
Massima temperatura superficiale	$350 \text{ }^\circ\text{C}$
Sensore di temperatura	RTS superficie
Materiali del sensore	NiCr/CuNi
Materiali del contenitore	Rame ed ottone
Precisione di calibrazione	$\pm 3\%$
Ripetibilità	2%

Il sensore *Vatell HFM-7E/L* permette la misura contemporanea di due grandezze: potenza termica per unità di superficie (flusso di calore) e temperatura. Il segnale principale è generato da un sensore di flusso termico realizzato da una termopila a film sottile (*HFS*). Il suo spessore è inferiore ai $2 \mu\text{m}$. La termopila ricopre la maggior parte della superficie ricevente del sensore. Questa fornisce un segnale in tensione continua proporzionale al flusso termico a cui è sottoposto. La polarità del segnale indica il verso del flusso di calore. La termopila è in grado di misurare flussi termici convettivi e radiativi con un campo di ricezione di 180° . Il secondo segnale disponibile è la misura di temperatura del substrato sul quale è depositata la termopila *HFS*. Nel modello *Vatell HFM-7E/L* questa temperatura è fornita da una termoresistenza (*RTS*) realizzata mediante il deposito di un sottile strato di puro platino sul bordo esterno del sensore. La temperatura della superficie può essere usata per correggere il segnale di uscita del sensore di flusso, compensando la variazione di conducibilità termica dell'elemento sensibile.

La faccia ricevente del sensore è rivestita da uno strato sottile (circa $5 \mu\text{m}$) di *Pyromark 1200*. Il rivestimento della superficie assorbente è consigliata in caso di misure di flusso termico radiativo. Questo rivestimento nero per alte temperature (fino a 1000°C) permette di aumentare l'emissività della superficie, migliorandole le caratteristiche di assorbimento. A differenza della vernice *Zynolite*, per le cui caratteristiche si rimanda al lavoro di Ballestrin *et al.* (2003), la vernice *Pyromark 1200* presenta un assorbimento più uniforme dal punto di vista spettrale. Nel *range* di lunghezze d'onda dello spettro solare il coefficiente di assorbimento medio dichiarato dal costruttore è pari a 0.95, mentre il coefficiente medio di assorbimento nell'infrarosso (tra $3 \mu\text{m}$ e $14 \mu\text{m}$) è superiore a 0.93 (Song *et al.* 2014). La presenza del rivestimento la risposta del sensore è pari a $300 \mu\text{s}$.



Figura 30 – Sensore di flusso termico Vatell HFM-7E/L (Vatell Corporation 2015).

Il costruttore del microsensore di flusso termico fornisce una formula per il calcolo del flusso concentrato q'' a partire dalla tensione prodotta dalla termopila V_{TP} e dalla temperatura T rilevata dalla termoresistenza:

$$q'' = \frac{V_{TP}}{g \cdot T + h}$$

in cui g e h sono costanti di calibrazione fornite nel certificato di calibrazione del sensore.

Per diminuire la dipendenza dalle condizioni termiche dell'ambiente esterno, il sensore HFM-7E/L viene inserito in un corpo in rame raffreddato. L'utilizzo del corpo raffreddato è particolarmente indicato per applicazioni con lunghi tempi di misura o per sensori interessati da flussi termici particolarmente intensi. Inoltre, se la temperatura del fluido di raffreddamento del sensore (acqua distillata) è prossima alla temperatura dell'aria dell'ambiente circostante, è possibile minimizzare gli effetti della convezione sulla misura del flusso solare concentrato, senza ricorrere a sensori dotati di copertura vetrata, che presentano un angolo di accettazione del flusso incidente limitato.



Figura 31 - Sensore di flusso termico Vatel HFM-7E/L con corpo di raffreddamento in rame (Vatell Corporation 2015).

Il *Laboratorio di Conversione dell'Energia Solare* è altresì dotato di un sistema di misura dell'irradianza solare. Il sistema comprende un pireliometro *Kipp&Zonen CHP1* montato su un inseguitore solare ad elevata precisione ed è impiegato per la misura della radiazione solare diretta (*DNI*). La misurazione della *DNI* è fondamentale in quanto costituisce l'input energetico dei sistemi solari a concentrazione. Conoscendo il valore di *DNI* e area di apertura del concentratore è possibile stabilire il valore di potenza termica dei raggi solari che incontrano la superficie riflettente.

5 Tecnica sperimentale e elaborazione dei dati

Prima di ogni prova sperimentale, gli specchi parabolici che formano l'ottica primaria del concentratore, il pireliometro e il sensore per posizionamento del concentratore vengono puliti in modo da evitare effetti indesiderati dovuti alla polvere o per depositi superficiali.

La misura del flusso termico generato dalla concentrazione della radiazione solare diretta è eseguita considerando una lunghezza focale di 1200 mm. Questa dimensione è relativa ad una sola delle due file di specchi che compongono il concentratore. L'altra fila non è stata oggetto di misurazioni. Questo non costituisce una fonte di incertezza in quanto, essendo l'angolo di incidenza dei raggi solari sull'area di apertura sempre prossimo a zero, la mutua influenza tra le due file di specchi adiacenti è molto limitata. Questo è confermato dagli studi di Riffelmann *et al.* (2006). La lunghezza focale è divisa in segmenti uguali, individuando 10 stazioni equidistanti lungo l'asse x. L'origine dell'asse x è posta in corrispondenza della proiezione del bordo esterno della fila degli specchi considerata sul piano di misura.

La misura del flusso termico generato dalla concentrazione della radiazione solare è eseguita con le seguenti modalità. Lo *slider* verticale viene collocato in posizione di riposo sulla prima stazione, e viene avviato il ciclo di scansione. La posizione di riposo dello *slider* si trova a 7 cm sotto alla linea di fuoco ideale. Il sensore disposto sullo *slider* in movimento, esegue una scansione a velocità costante (a meno delle rampe iniziali e finali di accelerazione e decelerazione) della regione di concentrazione sul piano di misura. La corsa utile dello *slider* interessa un percorso lungo l'asse z pari a 13.5 cm. In contemporanea, il pireliometro rileva i valori di radiazione normale diretta (*DNI*) che investe il concentratore. Terminata la scansione della regione di concentrazione, lo *slider* verticale viene riposizionato alla successiva stazione lungo l'asse x e viene avviato un nuovo ciclo di scansione. Per ogni stazione, i segnali di posizione (coordinate x e z), flusso termico, temperatura e *DNI* vengono acquisiti in continuo alla massima velocità di acquisizione possibile durante la scansione. L'acquisizione dei segnali avviene sia durante la fase di salita sia durante la fase di discesa. Il ciclo di scansione è ripetuto per tutte le stazioni presenti lungo l'asse x.

La frequenza delle stazioni lungo l'asse x, la velocità di traslazione lungo l'asse z e la frequenza di campionamento determinano il numero dei dati sperimentali ottenibili. Maggiore è il numero di dati acquisiti maggiore sarà la definizione nella mappatura della radiazione concentrata sul piano di misura. La velocità di dello *slider* lungo l'asse z è stata variata tra 1.5 cm s^{-1} e 3 cm s^{-1} . La scansione completa per una lunghezza focale pari a 1200 mm dura circa 3 minuti in funzione della velocità di movimentazione scelta.

Una prova di scansione è ritenuta valida se la variazione della radiazione normale diretta (*DNI*) misurata dal pireliometro rimane confinata all'interno dei valori d'incertezza sperimentale dello strumento stesso.

Seguendo questo principio, le prove sono state condotte in rapida successione, in modo da mantenere le medesime condizioni di radiazione normale diretta e verificare la ripetibilità dei risultati ottenuti.

Il circuito di raffreddamento del sensore è alimentato con una portata di 60 kg h^{-1} di acqua distillata. La temperatura di ingresso dell'acqua è mantenuta costante tramite un secondo circuito alimentato da acqua di pozzo (360 kg h^{-1} a 18°C) interfacciato al circuito di raffreddamento del sensore attraverso uno scambiatore. Durante un ciclo di salita e discesa dell'attuatore elettrico lineare in una stazione, si è visto che la temperatura del sensore è sempre compresa tra i 19°C e i 23°C . In base al rapporto di calibrazione, a parità del segnale di tensione in uscita dalla termopila, una differenza nella temperatura del sensore di 5°C comporta una variazione del flusso misurato pari a 0.6%.

5.1 Elaborazione dati

L'uso di un sistema di raffreddamento attivo permette quindi di limitare efficacemente la variazione di temperatura del sensore. Per questo motivo si è ritenuto accettabile utilizzare un valore medio di temperatura (21°C) per la correzione del flusso concentrato.

La presenza della vernice *Pyromark 1200* sulla superficie ricevente del sensore assicura una risposta uniforme nel *range* di lunghezze d'onda dello spettro di emissione della cavità agente come corpo nero utilizzata durante la calibrazione. Questo comportamento associato all'altrettanto uniforme risposta nello

spettro solare, ha permesso di ritenere non necessaria l'applicazione un coefficiente correttivo che tenga conto delle differenze fra i due spettri.

Al fine di ricavare la distribuzione del flusso concentrato e calcolare la potenza termica incidente nella regione di concentrazione, con sufficiente definizione, si richiede una maggiore risoluzione spaziale rispetto a quella fornita dalla mappatura definita sperimentalmente. Per questa ragione, i dati sperimentali acquisiti (x, z, q'') vengono processati e interpolati numericamente in ambiente *Matlab*. Fra i metodi di interpolazione numerica disponibili in ambiente *Matlab* sono vagliati il metodo lineare, il metodo cubico e il metodo spline biarmonico. Il calcolo della potenza incidente è risultato indipendente dal metodo di interpolazione scelto. Il metodo di interpolazione scelto è di tipo spline biarmonico con una risoluzione di 1 mm lungo l'asse z e 1 mm lungo l'asse x . Da questa interpolazione si ricava una mappatura della radiazione concentrata composta da circa 140000 punti.

Il calcolo della potenza termica concentrata, avviene applicando la metodologia proposta da Ballestrin *et al.* (2002) e qui brevemente riportata. All'interno della porzione di regione di concentrazione presa in esame A_{rc} si individuano n punti ottenuti dall'interpolazione numerica dei dati sperimentali; a ciascun punto i -esimo corrisponde un valore di flusso termico specifico q''_i ; la potenza termica incidente sulla porzione di regione di concentrazione A_{rc} viene calcolata integrando numericamente i valori di flusso termico specifico q''_i secondo la seguente formula:

$$P_t = \frac{A_{rc}}{n} \sum_{i=1}^n q''_i$$

Una volta calcolata la potenza riferita alla porzione della regione di concentrazione, il fattore di intercettazione γ ad essa riferito viene calcolato come:

$$\gamma = \frac{P_t}{DNI A_{ap} \rho_m} = \frac{1}{DNI A_{ap} \rho_m} \frac{A_{rc}}{n} \sum_{i=1}^n q''_i$$

dove DNI è la radiazione normale incidente sull'area di apertura degli specchi A_{ap} e ρ_m è il coefficiente di riflessione nominale degli specchi (96.1%).

L'incertezza sperimentale associata alla potenza termica nella porzione della regione di concentrazione considerata è data dalla combinazione delle incertezze del metodo di integrazione, del metodo di interpolazione e di quelle associate al sistema di movimentazione utilizzato. L'incertezza sul metodo di interpolazione $u_{int}(P_t)$ viene valutata secondo la seguente formula, tratta dal lavoro di Ballestrin *et al.* (2002):

$$u_{int}(P_t) = \frac{A_{rc}}{n} \sum_{i=1}^n u(q''_i) + \frac{u(A_{rc})}{n} \sum_{i=1}^n q''_i$$

dove $u(q''_i)$ rappresenta l'incertezza nella misura del flusso concentrato (3%) e $u(A_{rc})$ è l'incertezza dell'area della porzione di regione di concentrazione considerata. Questa è calcolata considerando un errore di 1 mm per entrambe le dimensioni misurate lungo gli assi z e x .

Con una risoluzione così fitta, la variazione dei risultati quando si utilizzano metodi di interpolazione diversi è attorno a 0.3%. Pertanto si è deciso di trascurare l'incertezza associata al metodo di interpolazione. Rispetto allo studio compiuto da Ballestrin *et al.* (2002), in cui è considerato un sistema di concentrazione ad eliostati su un ricevitore centrale di circa 800 mm x 800 mm, la geometria del concentratore solare parabolico lineare asimmetrico considerata in questo lavoro permette un maggiore controllo della posizione del sensore e della collocazione del sistema di movimentazione semiautomatico rispetto all'area

di concentrazione da analizzare. Si ritiene pertanto di poter trascurare anche questo componente di incertezza.

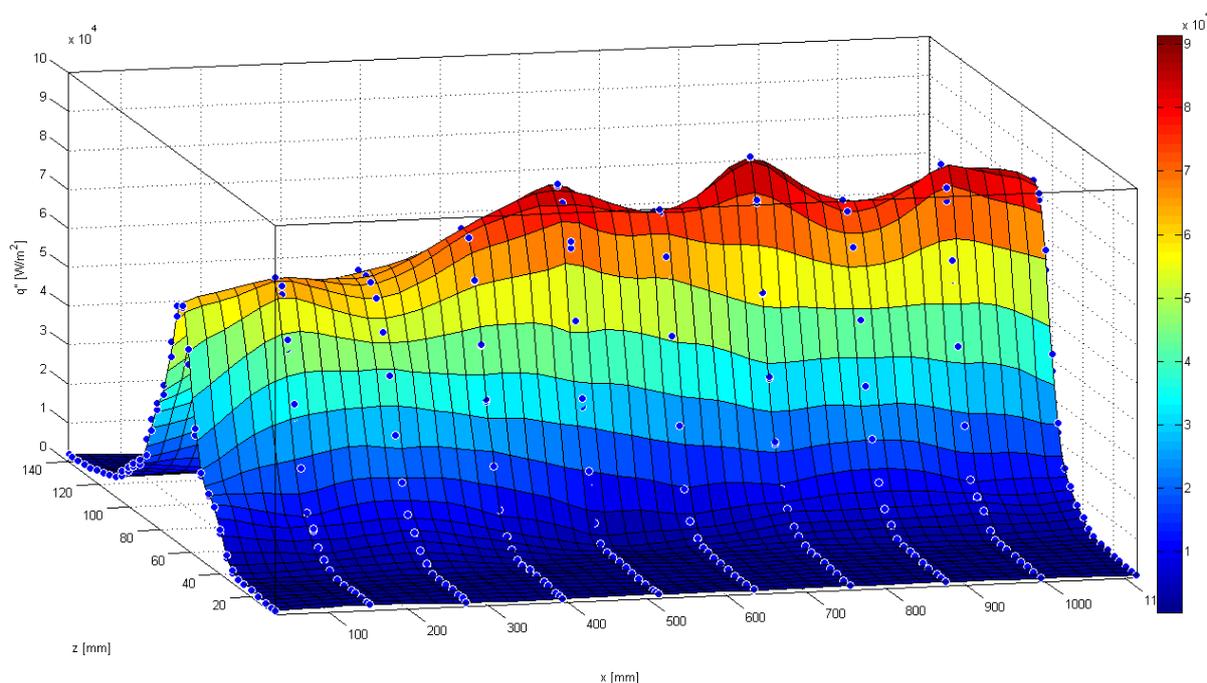
Infine, l'incertezza sul fattore di intercettazione è calcolata applicando la legge di propagazione degli errori alla formula sopra riportata e trascurando l'incertezza associata all'area di apertura e al coefficiente nominale di riflessione degli specchi parabolici del concentratore.

6 Discussione dei risultati e modellizzazione

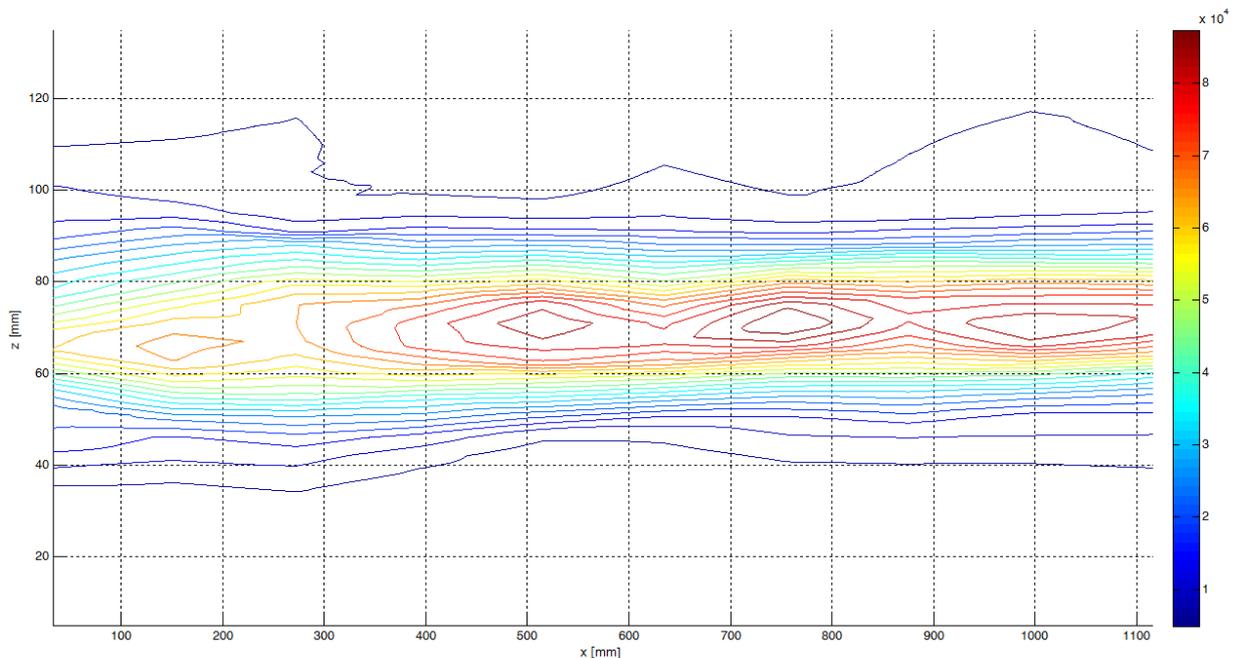
I dati presentati nel presente capitolo fanno riferimento a prove sperimentali condotte durante una giornata serena nel mese di settembre 2015 a breve distanza temporale (qualche minuto) in modo da assicurare condizioni operative pressoché identiche e verificare la ripetibilità dei risultati ottenuti. Le condizioni ambientali durante le prove sperimentali sono state: radiazione normale diretta (DNI) media pari a 850 W m^{-2} , temperatura ambiente pari a circa 25°C con una velocità del vento di circa 1 m s^{-1} .

Le prove sono state effettuate con una velocità di traslazione dello *slider* pari a 2 cm s^{-1} , con una frequenza di campionamento di 200 ms. Ne risulta una risoluzione spaziale dei dati di flusso solare concentrato lungo l'asse z di circa 5 mm per le 10 stazioni distanziate 120 mm lungo la lunghezza focale (asse x). Queste condizioni hanno permesso l'acquisizione di una serie di 70 dati durante un ciclo completo di scansione (salita e discesa) per ciascuna stazione. Si rende quindi disponibile una mappatura sperimentale completa della radiazione concentrata definita da 700 punti sperimentali.

I primi grafici riportati in Figura 32a e in Figura 33a mostrano rispettivamente la distribuzione tridimensionale del flusso q'' per due prove a distanza di qualche minuto fra loro. La curva rappresentata è stata ottenuta dall'interpolazione numerica dei dati sperimentali raccolti attraverso un metodo biarmonico. I valori sperimentali sono identificati da punti blu. In questi grafici, viene considerato il flusso termico concentrato lungo l'intero piano di misura, definito dalle corse dei carrelli considerati nei test lungo gli assi x e z ($0 - 1100 \text{ mm}$ asse x , $0.5 - 140 \text{ mm}$ asse z). Al fine di assicurare una certa chiarezza di rappresentazione, la curva presentata ha una risoluzione differente da quella utilizzata per l'integrazione numerica e per il calcolo della potenza incidente. I grafici di Figura 32b e la Figura 33b rappresentano le linee isoflusso (flusso termico costante) riportate in un grafico bidimensionale x,z .



a)



b)

Figura 32 – Prova 1: a) grafico tridimensionale (x, z, q'') della distribuzione del flusso solare concentrato nell'area effettivamente scansionata dal microsensore di flusso termico; b) linee a flusso concentrato costante nel grafico (x, z) nell'area effettivamente scansionata dal microsensore di flusso termico

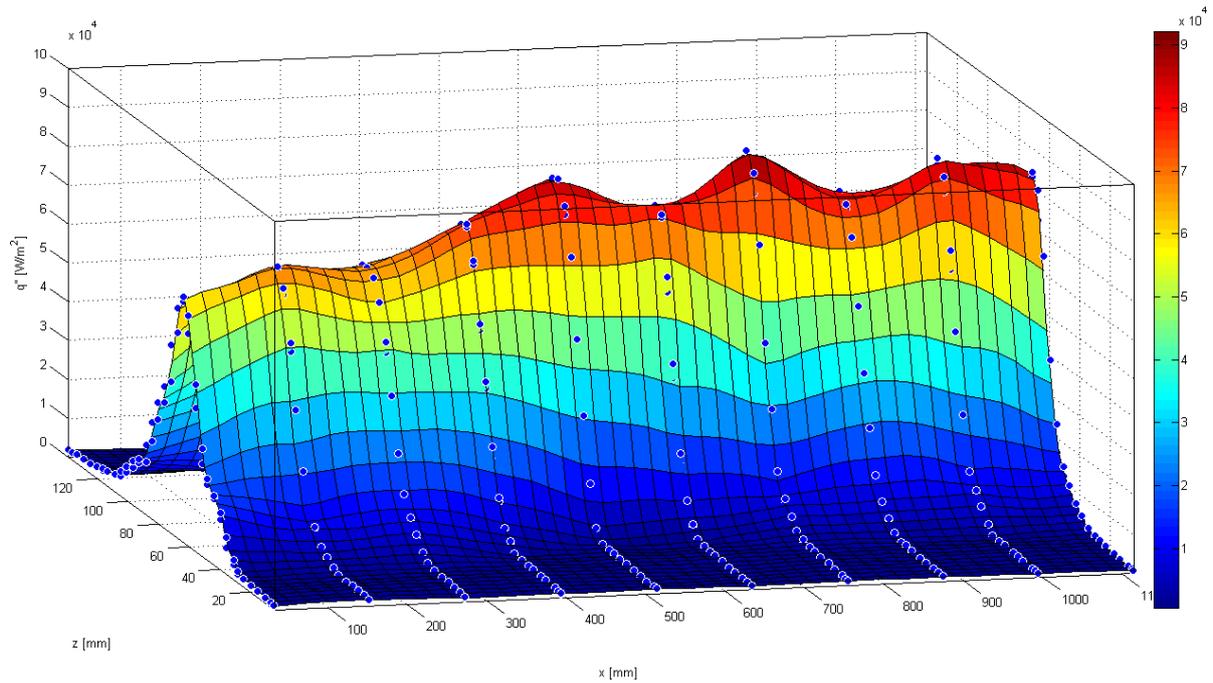
Il primo aspetto che emerge dall'osservazione della Figura 32 e 33 è la forte non uniformità della distribuzione del flusso termico lungo l'asse z . Di minore intensità risulta la disuniformità lungo la lunghezza focale (asse x). In prossimità del bordo dello specchio posto più esternamente (coordinata x pari 0 mm) la concentrazione della radiazione solare è meno efficace. Infatti, dopo i primi 280 mm lungo il resto della lunghezza focale il flusso solare concentrato si mantiene sopra ai 70 kW m^{-2} . Il massimo valore misurato per nelle condizioni di prova è pari a 92 kW m^{-2} mentre il minimo risulta 62 kW m^{-2} .

Come si evince dai grafici di isoflusso nelle Figura 32b e 33b, il flusso concentrato è interamente distribuito in una regione con un'ampiezza (asse z) inferiore a 100 mm intorno alla linea focale. Si può inoltre osservare come le curve isoflusso di concentrazione nella zona compresa tra 300 mm e 900 mm circa siano molto più compatte rispetto alle regioni più esterne. In questa zona centrale il flusso concentrato è distribuito in una fascia ampia circa 60 mm.

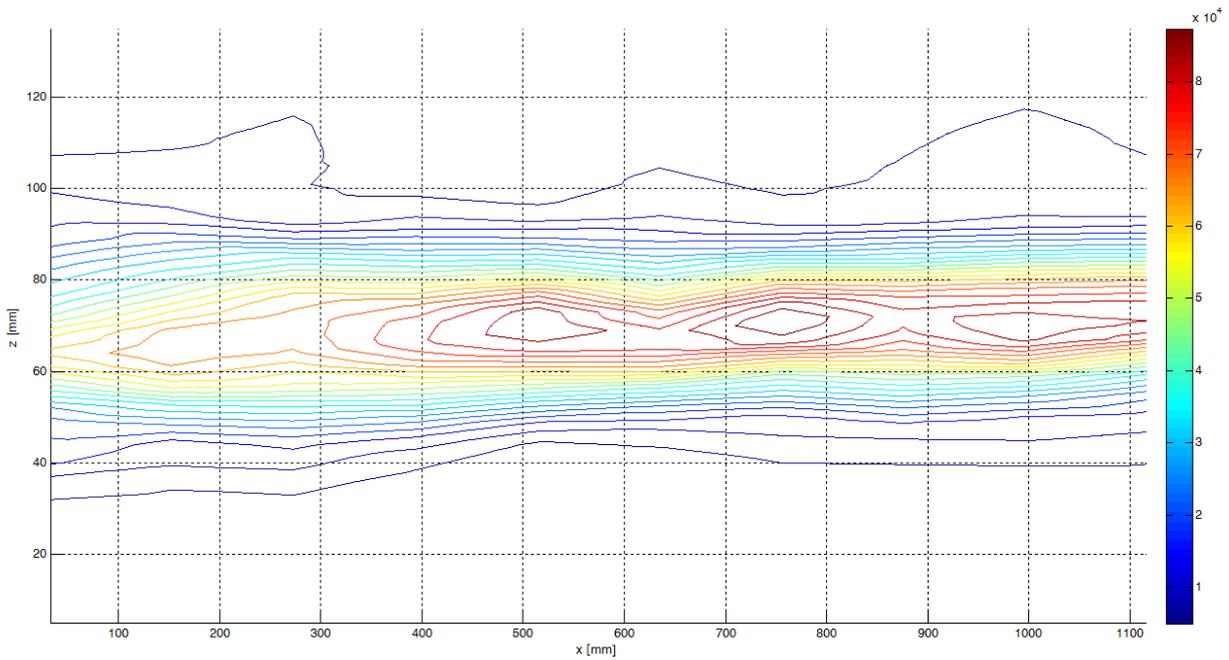
In base alle precedenti osservazioni, per la determinazione della porzione di regione di concentrazione impiegata per il calcolo della potenza termica, si sono considerate diverse ampiezze (asse z) della zona di concentrazione simmetrica rispetto alla posizione ideale della linea focale (coordinata z pari a 75 mm). I valori di ampiezza della regione considerati sono stati 100 mm, 80 mm, 70 mm e 50 mm. La lunghezza (asse x) della porzione di regione di concentrazione considerata è stata pari 1100 mm per tutti e quattro i casi, in modo da coprire l'intera lunghezza scansionata dal sensore.

L'incertezza sperimentale (con livello di confidenza pari a 2) della potenza calcolata è compresa tra $\pm 4\%$ e $\pm 5\%$ ed aumenta leggermente al diminuire della larghezza dell'area considerata. Nelle condizioni di prova, la potenza del flusso termico intercettato dalla porzione di regione di concentrazione è pari a circa 2600 W con un'ampiezza di 100 mm e di circa 2320 W quando si considera una larghezza di 50 mm. La potenza della radiazione solare incidente sull'area di apertura degli specchi è risultata pari a 2670 W.

Da questi risultati e assumendo un coefficiente di riflessione degli specchi pari al valore nominale fornito dal costruttore (96.1%) è stato possibile determinare il fattore di intercettazione. Il fattore di intercettazione varia dal 91% per l'area ampia 50 mm fino al 100% dell'area di 100 mm. L'incertezza sperimentale sul fattore di intercettazione calcolato è compresa fra $\pm 5\%$ e $\pm 5.3\%$.



a)



b)

Figura 33 – Prova 2: a) grafico tridimensionale (x, z, q'') della distribuzione del flusso solare concentrato nell'area effettivamente scansionata dal microsensore di flusso termico; b) linee a flusso concentrato costante nel grafico (x, z) nell'area effettivamente scansionata dal microsensore di flusso.

In Tabella 3 sono riportati i valori ottenuti in quattro diverse prove sperimentali considerando delle aree di elaborazione dei dati nella regione di concentrazione con larghezza di 100 mm, 80 mm, 70 mm e 50 mm come descritto precedentemente.

Tabella 3 – Dati sperimentali ottenuti in quattro diverse prove, con un'irradiazione normale diretta di circa 850 W m^{-2} . Nella riduzione dei dati, si è assunto un coefficiente di riflessione degli specchi costante, pari al valore nominale di 96.1%.

Prova 1				
	Ampiezza dell'area di concentrazione			
	100 mm	80 mm	70 mm	50 mm
Potenza incidente sull'area di apertura del concentratore	2660 W	2660 W	2660 W	2660 W
Potenza che raggiunge l'area di concentrazione q	2590 W	2530 W	2490 W	2320 W
Fattore di intercettazione γ	100%	99.0%	97.4%	90.8%
Incertezza su potenza che raggiunge l'area di concentrazione	$\pm 4\%$	$\pm 4.2\%$	$\pm 4.4\%$	$\pm 5\%$
Incertezza su fattore di intercettazione γ	$\pm 5.1\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 5.3\%$
Prova 2				
	Ampiezza dell'area di concentrazione			
	100 mm	80 mm	70 mm	50 mm
Potenza incidente sull'area di apertura del concentratore	2670 W	2670 W	2670 W	2670 W
Potenza che raggiunge l'area di concentrazione q	2605 W	2540 W	2495 W	2320 W
Fattore di intercettazione γ	100%	99.0%	97.2%	90.4%
Incertezza su potenza che raggiunge l'area di concentrazione	$\pm 4\%$	$\pm 4.2\%$	$\pm 4.4\%$	$\pm 5\%$
Incertezza su fattore di intercettazione γ	$\pm 5.1\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 5.3\%$
Prova 3				
	Ampiezza dell'area di concentrazione			
	100 mm	80 mm	70 mm	50 mm
Potenza incidente sull'area di apertura del concentratore	2670 W	2670 W	2670 W	2670 W
Potenza che raggiunge l'area di concentrazione q	2580 W	2520 W	2475 W	2335 W
Fattore di intercettazione γ	100%	98.2%	96.5%	91.0%
Incertezza su potenza che raggiunge l'area di concentrazione	$\pm 4\%$	$\pm 4.2\%$	$\pm 4.4\%$	$\pm 5\%$
Incertezza su fattore di intercettazione γ	$\pm 5.1\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 5.3\%$
Prova 4				
Ampiezza dell'area di concentrazione				

	100 mm	80 mm	70 mm	50 mm
Potenza incidente sull'area di apertura del concentratore	2675 W	2675 W	2675 W	2675 W
Potenza che raggiunge l'area di concentrazione q	2610 W	2550 W	2505 W	2330 W
Fattore di intercettazione γ	100%	99.2%	97.4%	90.6%
Incertezza su potenza che raggiunge l'area di concentrazione	$\pm 4\%$	$\pm 4.2\%$	$\pm 4.4\%$	$\pm 5\%$
Incertezza su fattore di intercettazione γ	$\pm 5.1\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 5.2\%$	$\pm 5.3\%$

I risultati sperimentali ottenuti nelle diverse prove sono in ottimo accordo tra di loro, a prova del fatto che il metodo utilizzato per la mappatura del flusso concentrato è affidabile.

6.1 Modellizzazione

La distribuzione del flusso solare concentrato è stata valutata anche implementando un modello ottico del concentratore solare in ambiente di simulazione *SolTrace* (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012). Questo software sviluppato e distribuito da National Renewable Energy Laboratory (NREL) permette di condurre l'analisi tramite la tecnica di *ray-tracing* basata sul metodo *Monte Carlo*. Il modello tiene conto dell'influenza del coefficiente di riflessione degli specchi parabolici, della forma del disco solare (*sunshape*) e di un fattore di errore ottico globale. Questo fattore tiene conto degli errori di forma degli specchi parabolici, della riflessione non ideale dei raggi solari e degli errori del sistema di inseguimento su due assi di cui è dotato il concentratore.

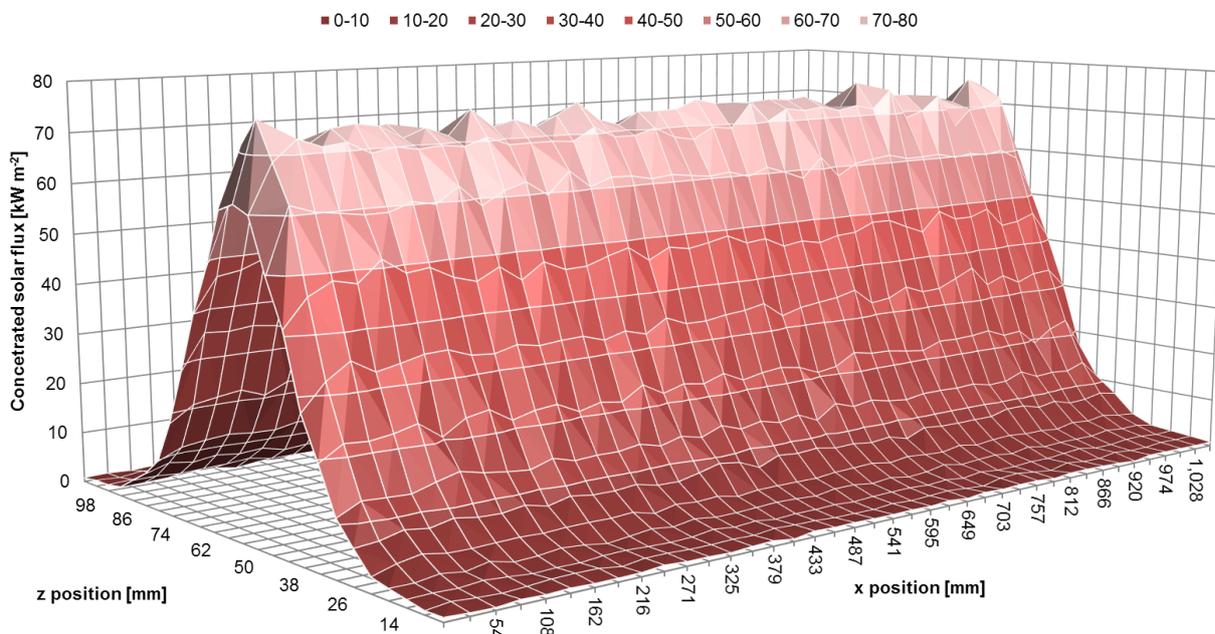


Figura 34 – Grafico tridimensionale (x, z, q^{''}) della distribuzione del flusso solare concentrato in un'area di 1082 mm x 100 mm ottenuta attraverso *Soltrace*, considerando un errore ottico totale di 5 mrad, un'irradianza solare diretta di 850 W m⁻² e una forma solare tipica per una giornata serena.

La forma solare *CRO* adottata nella presente analisi è stata scelta fra quelle proposte da Neumann *et al.* (2002) e si riferisce ad una tipica giornata di cielo sereno. L'errore ottico globale viene definito tramite una

distribuzione gaussiana. Nello studio numerico, sono stati considerati diversi valori dell'errore ottico, tra 2.5 mrad e 5 mrad (riferiti alla deviazione standard della distribuzione gaussiana che lo rappresenta).

In Figura 34, è riportata la distribuzione tridimensionale del flusso concentrato, riferita ad un errore ottico di 5 mrad, ottenuta nelle condizioni descritte sopra (risoluzione 25 *bins* lungo l'asse *z* e 40 *bins* lungo l'asse *x*).

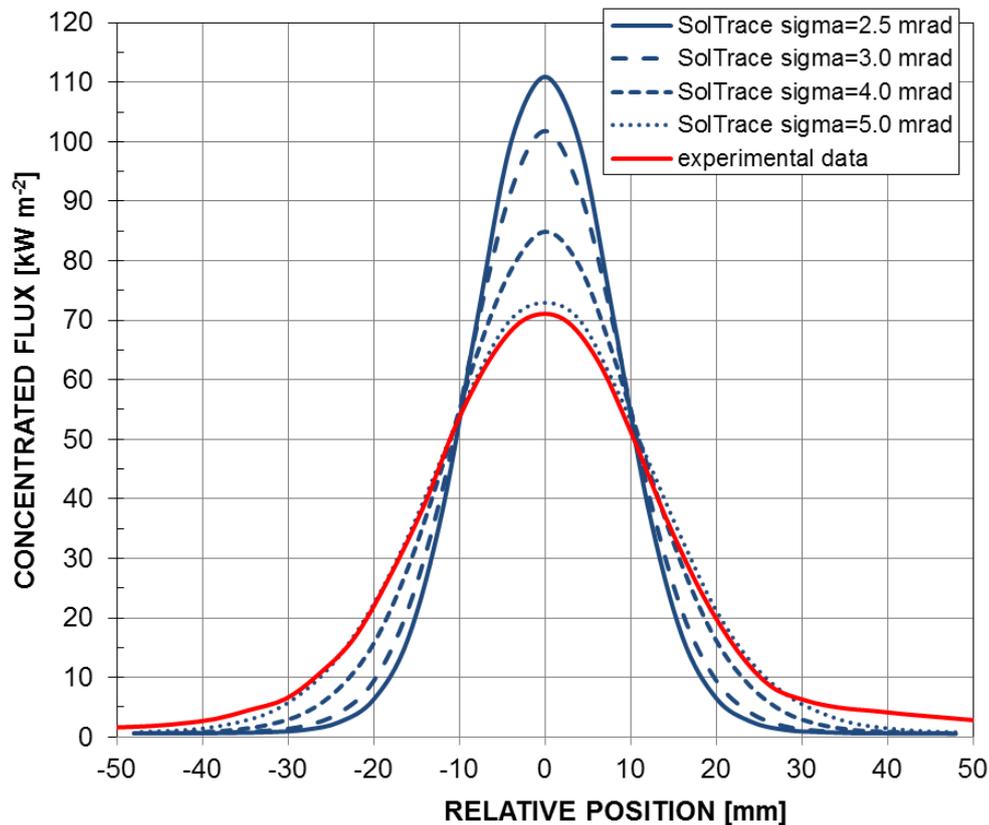


Figura 35 – Confronto tra le distribuzioni di flusso solare concentrato originate dalle simulazioni in *SolTrace* (blu) e dall'interpolazione dei dati sperimentali (rosso).

Le distribuzioni di flusso solare concentrato riportate in Figura 35 si riferiscono ad un valore di *DNI* pari a 850 W m^{-2} e ad una porzione della regione di concentrazione di 100 mm, centrata rispetto alla linea focale (indicata con 0). Ciascuna di esse è riferita ad un particolare valore d'errore ottico globale ed è ottenuta come media di 40 valori lungo la linea focale (asse *x*). È da notare che il profilo ottenuto dalle simulazioni non varia al variare della risoluzione di analisi dell'asse *z*, espressa in *bins* (*NREL 2012*). Si riporta per confronto, il profilo medio della distribuzione del flusso solare concentrato lungo l'asse *z* ottenuto dai dati sperimentali raccolti (in rosso). Si può osservare come la forma del profilo di distribuzione sperimentale abbia un andamento molto simile a quello che si ottiene attraverso l'analisi condotta con la metodologia *raytracing* e riferita ad un errore ottico totale di 5 mrad.

Infine, si sono confrontati i valori del fattore di intercettazione ricavati dai dati sperimentali con quelli ottenuti dalle simulazioni *Monte Carlo Ray-Tracing*. Infatti, il software *Soltrace* permette anche di stimare la potenza termica incidente sulla porzione della regione di concentrazione considerata e, pertanto, di calcolare il fattore di intercettazione. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono riportati in Tabella 4, in funzione dell'errore ottico e dell'ampiezza della porzione della regione di concentrazione.

Tabella 4 - Valori del fattore di intercettazione in funzione dell'errore ottico totale e della larghezza dell'area di concentrazione per il concentratore parabolico asimmetrico in esame ottenuti tramite analisi *ray-tracing* basata sul metodo Monte Carlo.

Errore ottico globale	Ampiezza dell'area di concentrazione			
	100 mm	80 mm	70 mm	50 mm
2.5 mrad	99.5 %	99.5 %	99.5 %	98.7 %
3 mrad	99.5 %	99.4 %	99.3 %	97.7 %
4 mrad	99.2 %	98.9 %	98.4 %	94.6 %
5 mrad	98.8 %	97.8 %	96.5 %	90.3 %

Si può constatare che i risultati ottenuti con un errore ottico di 5 mrad sono molto vicini a quelli misurati sperimentalmente. Il software di *ray-tracing* utilizzato si dimostra uno strumento molto valido per analizzare le prestazioni di un concentratore solare in diverse condizioni operative una volta che il modello del sistema in esame venga validato attraverso la caratterizzazione sperimentale delle sue prestazioni ottiche.

7 Conclusioni

In questo documento sono riportati i risultati dell'attività di ricerca svolta per lo sviluppo di una tecnica sperimentale per la misura diretta della radiazione solare concentrata e della sua distribuzione in concentratori a fuoco lineare e ricevitori a geometria piana. La presente ricerca trova applicazione in impianti sia di tipo solare termico che di tipo ibrido termico - fotovoltaico.

A valle dell'analisi delle soluzioni per la misura del flusso termico concentrato presenti in letteratura e delle più recenti soluzioni tecnologiche, è stato selezionato il metodo diretto con microsensore di tipo *HFM* con dissipazione del calore attiva. Coerentemente con le geometrie del concentratore parabolico a fuoco lineare e del ricevitore piano, è stato progettato un sistema di movimentazione lineare semiautomatizzato a due assi.

La campagna di misura è stata condotta su un prototipo di concentratore parabolico lineare asimmetrico facente parte delle strumentazioni disponibili nel *Laboratorio di Conversione dell'Energia Solare* sul tetto del *Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova*. I dati raccolti hanno portato alla mappatura discretizzata del flusso concentrato sulla regione di concentrazione. Il primo aspetto che emerge dall'analisi dei dati è la non uniformità della distribuzione del flusso termico lungo entrambi gli assi di movimentazione. Attraverso un opportuno metodo di interpolazione dei dati è stato possibile definire con precisione la dimensione dell'immagine solare attorno alla linea focale. Il flusso concentrato è interamente distribuito in una regione con un'ampiezza inferiore a 100 mm intorno alla linea focale. Si può inoltre osservare come le curve isoflusso di concentrazione nella zona compresa tra 300 mm e 900 mm circa siano molto più compatte rispetto alle regioni più esterne. In questa zona centrale il flusso concentrato è distribuito in una fascia ampia circa 60 mm. Nelle condizioni di prova (*DNI* media 850 W m^{-2} , temperatura ambiente 25°C , velocità media del vento 1 m s^{-1}) il flusso solare concentrato si mantiene sopra a 70 kW m^{-2} ad eccezione dei primi 280 mm. Il massimo valore misurato è pari a 92 kW m^{-2} mentre il minimo risulta 62 kW m^{-2} in prossimità del limite esterno della linea focale. I valori di potenza termica solare incidente sulla superficie piana di ricezione sono stati estrapolati dall'integrazione numerica delle distribuzioni del flusso concentrato sulla totale superficie del ricevitore piano. Dalla stima di questa grandezza è stato possibile valutare le prestazioni ottiche dei componenti del collettore solare a concentrazione in esame, in termini di fattore di intercettazione. Questo parametro varia dal 91% per la fascia ampia 50 mm attorno alla linea di fuoco, fino al 100% della fascia ampia 100 mm.

I risultati sperimentali sono stati confrontati con il modello ottico del collettore solare sviluppato all'interno di un ambiente software di *ray-tracing* durante l'attività dell'annualità precedente. Dal confronto è stato trovato un buon accordo a conferma della validità del metodo sperimentale sviluppato. In particolare, la simulazione con un errore ottico di 5 mrad presenta un profilo simile a quello sperimentale.

Alla luce dei risultati ottenuti, la metodologia sperimentale sviluppata nel corso della presente attività di ricerca costituisce un valido strumento per la misura del flusso concentrato su un ricevitore piano. Questa metodologia può essere validamente utilizzata per la caratterizzazione di elementi ottici a concentrazione lineare e per la progettazione di ricevitori piani.

Riferimenti bibliografici

- Baig, Hasan, Nabin Sarmah, Keith C. Heasman, and Tapas K. Mallick. 2013. "Numerical Modelling and Experimental Validation of a Low Concentrating Photovoltaic System." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 113: 201-219.
- Ballestrín, J., G. Burgess, and J. Cumpston. 2012. "18 - Heat Flux and Temperature Measurement Technologies for Concentrating Solar Power (CSP)." In *Concentrating Solar Power Technology*, edited by Keith Lovegrove and Wes Stein, 577-e4: Woodhead Publishing.
- Ballestrín, J., C. A. Estrada, M. Rodríguez-Alonso, C. Pérez-Rábago, L. W. Langley, and A. Barnes. 2006. "Heat Flux Sensors: Calorimeters Or Radiometers?" *Solar Energy* 80 (10): 1314-1320.
- Ballestrín, J. and R. Monterreal. 2004. "Hybrid Heat Flux Measurement System for Solar Central Receiver Evaluation." *Energy* 29 (5-6): 915-924.
- Ballestrin, Jesus. 2002. "A Non-Water-Cooled Heat Flux Measurement System Under Concentrated Solar Radiation Conditions." *Solar Energy* 73 (3): 159-168.
- Ballestrín, J., S. Ulmer, A. Morales, A. Barnes, L. W. Langley, and M. Rodríguez. 2003. "Systematic Error in the Measurement of very High Solar Irradiance." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 80 (3): 375-381.
- Bortolato, M., D. Del Col, A. Aboulmagd, S. Bortolin, S. Dugaria, and E. Magro. "Sviluppo E Sperimentazione Di Ricevitore a Minicanali Per Concentratore Solare Parabolico." Report RdS/PAR2013/163.
- Childs, P. R. N., J. R. Greenwood, and C. A. Long. 1999. "Heat Flux Measurement Techniques." *Proc Instn Mech Engrs (Part C)* 213.
- Diller, Thomas E. 2000. *Heat Flux* CRC Press.
- Eck, M., R. Uhlig, M. Mertins, A. Häberle, and H. Lerchenmüller. 2007. "Thermal Load of Direct Steam-Generating Absorber Tubes with Large Diameter in Horizontal Linear Fresnel Collectors." *Heat Transfer Engineering* 28: 42-48.
- Estrada, C. A., O. A. Jaramillo, R. Acosta, and C. A. Arancibia-Bulnes. 2007. "Heat Transfer Analysis in a Calorimeter for Concentrated Solar Radiation Measurements." *Solar Energy* 81 (10): 1306-1313.
- Fernández-Reche, Jesús, M. A. Marcelino Sánchez, Inmaculada Cañadas, Faustino Chenlo, José Rodríguez, and Jesús Ballestrín. 2008. "Concentrating PV: An Alternative to Calorimeters for Measuring High Solar Flux Densities." *J. Sol. Energy Eng*: 130-134.
- Ferriere, A. and B. Rivoire. 2002. "An Instrument for Measuring Concentrated Solar-Radiation: A Photo-Sensor Interfaced with an Integrating Sphere." *Solar Energy* 72 (3): 187-193.
- Groer, U. and A. Neumann. 1999. "Development and Test of a High Flux Calorimeter at DLR Cologne." *Le Journal De Physique IV* 9: 643-649.
- Häberle, A., C. Zahler, H. Lerchenmüller, M. Mertins, C. Wittwer, F. Trieb, and J. Dersch. 2002. "The Solarmundo Line Focussing Fresnel Collector. Optical and Thermal Performance and Cost Calculations." .
- Hager, J. M., S. Simmons, D. Smith, S. Onishi, L. W. Langley, and T. E. Diller. 1991. "Experimental Performance of a Heat Flux Microsensor." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 113 (2): 246-250.
- Ho, Clifford K. and Siri S. Khalsa. 2012. "A Photographic Flux Mapping Method for Concentrating Solar Collectors and Receivers." *Journal of Solar Energy Engineering* 134 (4): 041004-041004.
- Khanna, Sourav, Shireesh B. Kedare, and Suneet Singh. 2013. "Analytical Expression for Circumferential and Axial Distribution of Absorbed Flux on a Bent Absorber Tube of Solar Parabolic Trough Concentrator." *Solar Energy* 92: 26-40.
- Lüpfert, Eckhard, Klaus Pottler, Steffen Ulmer, Klaus-J Riffelmann, Andreas Neumann, and Björn Schiricke. 2006. "Parabolic Trough Optical Performance Analysis Techniques." *Journal of Solar Energy Engineering* 129 (2): 147-152.
- Montes, María J., Carlo Rubbia, Rubén Abbas, and José M. Martínez-Val. 2014. "A Comparative Analysis of Configurations of Linear Fresnel Collectors for Concentrating Solar Power." *Energy* 73: 192-203.

- National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2012. *SolTrace Version 2012.7.9* www.Nrel.Gov/Csp/Soltrace.
- Neumann, Andreas, Andreas Witzke, Scott A. Jones, and Gregor Schmitt. 2002. "Representative Terrestrial Solar Brightness Profiles." *Journal of Solar Energy Engineering* 124 (2): 198-204.
- Parretta, A., A. Antonini, M. Armani, G. Nenna, G. Flaminio, and M. Pellegrino. 2007. "Double-Cavity Radiometer for High-Flux Density Solar Radiation Measurements." *Applied Optics* 46 (12): 2166-2179.
- Pérez-Rábago, C. A., M. J. Marcos, M. Romero, and C. A. Estrada. 2006. "Heat Transfer in a Conical Cavity Calorimeter for Measuring Thermal Power of a Point Focus Concentrator." *Solar Energy* 80 (11): 1434-1442.
- Riffelmann, Klaus-Jürgen, Andreas Neumann, and Steffen Ulmer. 2006. "Performance Enhancement of Parabolic Trough Collectors by Solar Flux Measurement in the Focal Region." *Solar Energy* 80 (10): 1303-1313.
- Röger, Marc, Patrik Herrmann, Steffen Ulmer, Miriam Ebert, Christoph Prah, and Felix Göhring. 2014. "Techniques to Measure Solar Flux Density Distribution on Large-Scale Receivers." *Journal of Solar Energy Engineering* 136 (3): 031013-031013.
- Schiricke, Björn, Robert Pitz-Paal, Eckhard Lüpfert, Klaus Pottler, Markus Pfänder, Klaus-J Riffelmann, and Andreas Neumann. 2009. "Experimental Verification of Optical Modeling of Parabolic Trough Collectors by Flux Measurement." *Journal of Solar Energy Engineering* 131 (1): 011004-011004.
- Song, X., Huan, K., Dong, W., Wang, J., Zang, Y., Shi, X., 2014. "Research on infrared radiation characteristics of Pyromark 1200 high temperature coating". *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 9300, 93001S-1.
- Vatell Corporation. 2015. *HFM-6, HFM-7 & HFM-8 Operator's Manual – Version 1.0* .
- Wang, P., D. Y. Liu, and C. Xu. 2013. "Numerical Study of Heat Transfer Enhancement in the Receiver Tube of Direct Steam Generation with Parabolic Trough by Inserting Metal Foams." *Applied Energy* 102: 449-460.
- Zhu, Guangdong, Tim Wendelin, Michael J. Wagner, and Chuck Kutscher. 2014. "History, Current State, and Future of Linear Fresnel Concentrating Solar Collectors." *Solar Energy* 103: 639-652.