



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
ENERGETICA**

**STUDIO TEORICO E SPERIMENTALE DI UN
CONCENTRATORE SOLARE PARABOLICO LINEARE
CON RICEVITORE PIANO**

**Relatore: Prof. Davide Del Col
Correlatore: Ing. Matteo Bortolato**

**Laureando: Davide Rebellato
Matricola:1079258**

ANNO ACCADEMICO 2015 – 2016

INDICE

Sommario	5
1 INTRODUZIONE	11
2 METODI DI MISURA DEL FLUSSO CONCENTRATO	15
2.1 Metodi Diretti	16
2.2 Metodi Indiretti.....	25
3 MODELLI OTTICI.....	29
4 SISTEMA DI MISURA SCELTO	31
4.1 Output del sensore	32
4.2 Il sistema di concentrazione	34
4.3 Apparato di misura	35
5 METODOLOGIA DI RIDUZIONE DEI DATI SPERIMENTALI.....	37
5.1 Incertezza di misura.....	38
6 RISULTATI SPERIMENTALI.....	39
6.1 Distribuzione della densità di flusso sul ricevitore.....	39
6.2 Fattore d' intercettazione	42
7 MODELLO OTTICO	45
8 MODELLO TERMICO DEL COLLETTORE	49
8.1 Modello fisico.....	49
8.2 Modello numerico	62
8.3 Limiti del modello	63
9 RISULTATI DEL MODELLO NUMERICO.....	65
10 CONCLUSIONI.....	71
Appendice A.....	75
Appendice B.....	83
Appendice C.....	87
Bibliografia.....	89

Sommario

In questo lavoro si analizzano le prestazioni ottiche di un concentratore solare parabolico a fuoco lineare per la produzione di energia termica in media temperatura (80-250°C). In particolare si misura la distribuzione della radiazione solare concentrata e si propone un modello termico di un ricevitore piano.

La prima parte del lavoro introduce all'uso dell'energia solare concentrata descrivendo brevemente la radiazione solare incidente, le tecnologie più utilizzate per la concentrazione e i fattori che influenzano il rendimento di un collettore solare a concentrazione. Segue una panoramica sugli strumenti utilizzati per la misura del flusso solare concentrato: in particolare per i vari strumenti sono state analizzate le problematiche relative alla misura del flusso solare concentrato e viene descritta una possibile applicazione. Di seguito vengono descritti i metodi per la creazione di un modello ottico al calcolatore del collettore a concentrazione. Dall'analisi dei vari sistemi di misura, è stata effettuata la scelta di un microsensore tipo HFM per la misura del flusso concentrato. È stato progettato e realizzato il sistema di movimentazione lineare semiautomatizzato a due assi in modo tale da adattarlo alla geometria del sistema a concentrazione parabolico a fuoco lineare. Questo sistema di misura ha permesso di raccogliere dei dati di flusso solare in determinati punti della regione di concentrazione. Successivamente questi dati sono stati elaborati da un programma in Matlab che li ha interpolati per ottenere la mappatura del flusso solare incidente. Infine integrando numericamente la mappa del flusso solare si ottiene la potenza incidente nella regione di concentrazione. Da questi valori è possibile identificare le prestazioni ottiche del collettore a concentrazione che sono stati confrontati con quelli ottenuti dal modello ottico sviluppato all'interno di un software di ray-tracing.

La seconda parte del lavoro si concentra sulla creazione di un modello termico per un ricevitore piano con turbolatore interno posto sulla linea del fuoco. I risultati ottenuti sono poi confrontati con i dati sperimentali già disponibili nel laboratorio di conversione di energia solare del DII. Tra le analisi il modello studia un deflusso monofase con e senza turbolatore e convezione naturale o forzata lato aria esterna. Infine si ipotizza l'uso di una copertura vetrata per analizzare la variazione di rendimento del collettore rispetto al caso precedente.

Lista dei simboli

Capitolo 1

Grandezza	Simbolo	Unità di misura
Radiazione globale sull'orizzontale	GDI	[W/m ²]
Radiazione diretta sul piano orizzontale	DHI	[W/m ²]
Radiazione diffusa sull'orizzontale	DIF	[W/m ²]
Rendimento	η	[-]
Incidence angle modifier	K(Φ)	[-]
Coefficiente di assorbimento	α	[-]
Coefficiente di trasmissività	τ	[-]
Fattore d'intercettazione	γ	[-]
Riflessività degli specchi	ρ	[-]

Indici

opt	Ottico
ric	Ricevitore

Capitolo 4

Grandezza	Simbolo	Unità di misura
Temperatura	T	[°C]
Resistenza elettrica	R	[Ω]
Costante della calibrazione	a	[°C/ Ω] ⁻³
Costante della calibrazione	b	[°C/ Ω] ⁻²
Costante della calibrazione	c	[°C/ Ω]
Costante della calibrazione	d	[°C]
Costante della calibrazione	e	[Ω /°C]
Costante della calibrazione	f	[Ω]
Costante della calibrazione	g	[μ V/W/cm ² /°C]
Costante della calibrazione	h	[μ V/W/cm ²]
Tensione termoresistenza	V _{rts}	[V]
Corrente termoresistenza	I _{rts}	[A]
Tensione Heat Flux Microsensor	V _{HFM}	[μ V]
Amplificatore	G _{rts}	[-]
Flusso termico incidente	q''	[W/cm ²]

Indici

0	alla temperatura di calibrazione
---	----------------------------------

Capitolo 5

Grandezza	Simbolo	Unità di misura
Potenza totale	P_t	[W]
Area	A	[m ²]
Numero di punti	n	[-]
Flusso incidente	q''	[W/m ²]
Fattore d'intercettazione	γ	[-]
Radiazione diretta incidente	DNI	[W/m ²]
Riflessività degli specchi	ρ	[-]
Incertezza	u	[-]

Indici

ric	ricevitore
rc	Regione di concentrazione
sp	Specchi
int	integrazione

Capitolo 8

Grandezza	Simbolo	Unità di misura
Potenza	q	[W]
Radiazione diretta incidente	DNI	[W/m ²]
Rendimento	η	[-]
Area	A	[m ²]
Viscosità dinamica	μ	[kg/(m s)]
Calore specifico	cp	[J/(kg K)]
Conducibilità termica	λ	[W/(m K)]
Accelerazione di gravità	g	[m/s ²]
Dilatazione termica	β	[1/K]
Dimensione caratteristica per Rayleigh	L	[L]
Diffusività termica	α	[m ² /s]
Diametro equivalente	d_{eq}	[m]
Perimetro esterno ricevitore	p_{ext}	[m]
Pi greco	π	[-]
Coefficiente di scambio termico	h	[W/m ² K]
Costante di Stefan Boltzman	σ	[W/m ² K ⁴]
Emissività della superficie	ξ	[-]
Resistenza termica totale	R_{tot}	[m ² K/W]
Perimetro ricevitore in alluminio	Pi	[m]
Spessore canale in alluminio	B	[m]
Shape factor	SF	[m]
Numeri adimensionali del turbolatore	α	[-]

Numeri adimensionali del turbolatore	δ	[-]
Numeri adimensionali del turbolatore	γ	[-]
Numero di Reynolds	Re	[-]
Numero di nusselt	Nu	[-]
Numero di Prandtl	Pr	[-]
Numero di Rayleigh	Ra	[-]
Fattore di vista	Fij	[-]
Diametro idraulico	d_{id}	[m]
Fattore d'attrito	f	[-]
Colburn Factor	j	[-]

Indici

inc	Incidente
int	Interno turbolatore
cond	Conduzione
is	Isolante
al	Alluminio
conv	Convezione
for	Forzata
nat	Naturale
irr	Irraggiamento
sup	Superficiale
sky	Cielo
air	Aria
vetro	Vetro
opt	Ottico
sp	Specchi
l	Laminare
t	Turbolento
T	Laminar thin-layer
cav	Cavità

Capitolo 9

Grandezza	Simbolo	Unità di misura
Temperatura	T	[°C]
Radiazione diretta incidente	DNI	[W/m ²]

Indici

m,rid	Media ridotta
out	In uscita turbolatore
in	In ingresso turbolatore
amb	ambiente

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi anni i crescenti problemi ambientali, insieme alla limitatezza delle risorse e all'instabilità geopolitica delle aree di estrazione dei più classici vettori energetici come petrolio e gas hanno portato a un sempre maggiore interesse per tutte le tecnologie rinnovabili. Per questi motivi il settore ha visto, e vede tuttora, a livello globale una crescita importante sia sotto il profilo commerciale che sotto il profilo della ricerca.

Le tecnologie rinnovabili sfruttano diverse fonti energetiche e tra queste possiamo senza dubbio annoverare il sole che in qualsiasi momento irradia 1367 W/m^2 al di fuori dell'atmosfera terrestre. Questo valore è noto come costante solare; prima di arrivare al suolo parte dell'energia viene riflessa e diffusa dall'atmosfera in maniera proporzionale al campo ottico che il raggio deve compiere nell'attraversarla. Ricordando poi che la terra è sferica, che gira su se stessa con un certo angolo di inclinazione e che compie un'orbita ellittica attorno al sole, possiamo facilmente osservare che l'energia disponibile al suolo presenta delle discontinuità di disponibilità tipiche delle fonti rinnovabili. Per questi motivi, facendo una media annuale dell'energia incidente, osserviamo che tutti i paesi compresi in una fascia solare che identifichiamo con i tropici, sono i principali candidati per l'uso massiccio e conveniente dell'energia solare.

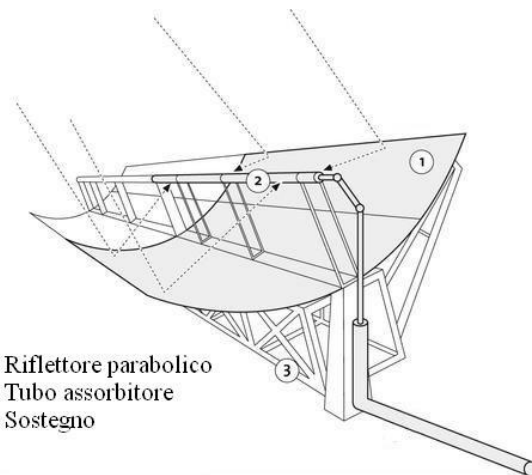
Il flusso di energia può poi essere convertito in energia elettrica per mezzo di tecnologie fotovoltaiche o in calore che deve essere fornito a un determinato livello di temperatura. Tralasciando le tecnologie fotovoltaiche, che interessano marginalmente il lavoro di tesi, possiamo osservare che sotto il punto di vista della produzione di calore esistono diverse tecnologie che mirano a soddisfare tale richiesta. La generazione di calore è sempre legata a un livello di temperatura perché i processi umani hanno diverse necessità termiche. Possiamo dividere questi bisogni in tre diversi livelli che identifichiamo con bassa, media o alta temperatura. In particolare il settore civile ha necessità di avere molto calore a bassa temperatura (sotto gli 80°C) mentre il settore industriale ha un maggior bisogno di calore in media (tra gli 80°C e i 250°C) o alta temperatura (oltre 250°C). Gli ultimi due livelli sono interessanti per la ricerca perché le rinnovabili hanno già vinto la sfida di proporre soluzioni economicamente vantaggiose e tecnicamente valide per la bassa temperatura, ma molto lavoro c'è da fare per la media e alta temperatura. Ecco quindi che in un'ottica di maggior utilizzo delle fonti rinnovabili lo sfruttamento dell'energia solare termica si concentrerà sul proporre soluzioni per i livelli di temperatura più elevati.

Il modo trovato per raggiungere questi obiettivi è quello di concentrare la radiazione solare in un'area più o meno ristretta. Questo permette di raggiungere elevati flussi solari incidenti e di limitare le perdite termiche verso l'ambiente esterno che sono proporzionali all'area del ricevitore. I tipi più comuni di concentratori solari sono: Fresnel, parabolici, puntuali e a torre solare. I sistemi Fresnel sono composti da un campo di specchi piano che concentrano la radiazione su un ricevitore posto a una certa altezza (Figura 1). I concentratori parabolici possono essere di due tipi: a fuoco lineare o puntuali. I primi sono caratterizzati da un sistema di inseguimento su un'asse ed essere orientati nord-sud o

est-ovest. Questi tipi di ricevitori sono tra i più diffusi nel mercato e una delle prime applicazioni è stata la produzione di energia elettrica attraverso ciclo Rankine portando alla progettazione di ricevitori molto performanti. Gli altri tipi di ricevitori puntuali sono invece caratterizzati da un paraboloide che insegue la radiazione solare su due assi e la concentra nel fuoco dello stesso. Sono sistemi caratterizzati da elevati rapporti di concentrazione e temperature che possono raggiungere anche i 1500°C. Infine le torri solari sono dei sistemi di concentrazione puntuale utilizzate per la produzione di energia elettrica perché in grado di raggiungere temperature elevate. Sono impianti costituiti da una torre solare che accoglie la radiazione riflessa da un campo di concentratori elio stazionari composto da una serie di specchi piani o leggermente concavi. Questi elementi devono essere in grado di seguire il sole e quindi hanno un sistema di movimentazione su due assi. È chiaro che ogni tipologia è stata sviluppata per diversi obiettivi ma in generale possiamo dire che, a parità di area ricevente, maggiore è il rapporto di concentrazione maggiore sarà la temperatura che il sistema è in grado di raggiungere. Di seguito sono rappresentati i sistemi descritti precedentemente.



Figura 1 Concentratore Fresnel



1. Riflettore parabolico
2. Tubo assorbitore
3. Sostegno

Figura 2 Concentratore Parabolico a fuoco lineare

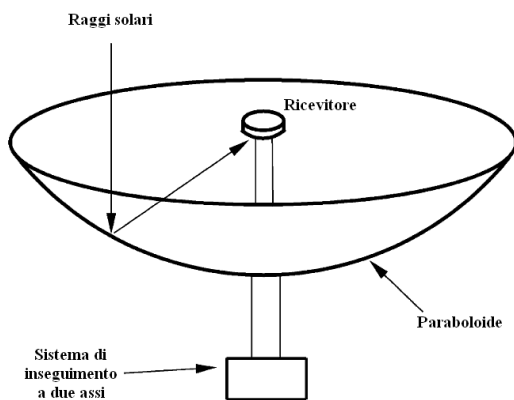


Figura 3 Concentratore parabolico puntuale

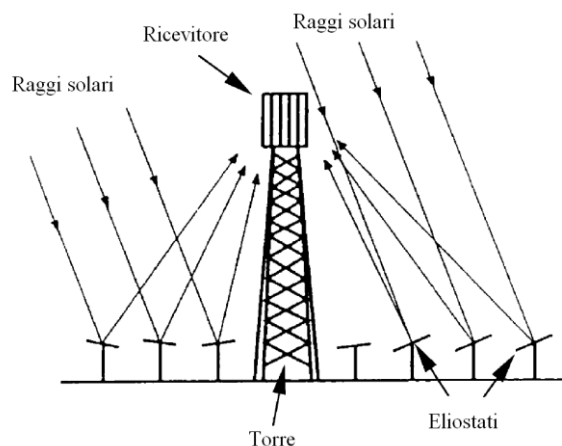


Figura 4 Torre solare

Prima di passare al concentratore, analizziamo brevemente la radiazione solare incidente sulla superficie terrestre perché interessa direttamente il funzionamento di un collettore a concentrazione. Come detto in precedenza l'atmosfera ha la caratteristica di attenuare e diffondere parte della costante solare, perciò la radiazione globale incidente risulta dalla somma di due componenti: la radiazione diretta sul piano orizzontale DHI e la radiazione diffusa sul piano orizzontale DIF.

$$GHI = DHI + DIF \quad (1.1)$$

Nell'immagine riportata sotto è possibile vedere come varia la componente globale al variare delle condizioni atmosferiche e le percentuali delle componenti diretta e diffusa tipiche per quella giornata.

Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
globale	1000 W/m ²	600 W/m ²	500 W/m ²	400 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	100 W/m ²	50 W/m ²
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Figura 5: Radiazione solare in funzione del tipo di cielo e composizione della stessa

Questo aspetto è molto importante perché il funzionamento del concentratore è influenzato dal tipo di giornata, poiché questa tecnologia è in grado di utilizzare solo la componente diretta. Il motivo è che i collettori a concentrazione utilizzano elementi di riflessione o rifrazione per concentrare la radiazione solare in una regione focale dove è posizionato un ricevitore. Tali dispositivi sono specchi o lenti che lavorano secondo le leggi dell'ottica geometrica ed è quindi importante sapere la direzione prevalente del raggio, ma nel caso della diffusa questa non ha una direzione prevalente e pertanto non può essere utilizzata. Si capisce quindi che i sistemi solari a concentrazione devono essere posizionati in regioni dove il rapporto tra diretta e diffusa è molto alto.

Tornando al collettore in esame abbiamo visto quanto sia importante catturare in maniera efficace la radiazione incidente. Questo aspetto può essere valutato accuratamente attraverso il rendimento globale del collettore con la seguente formula:

$$\eta = \eta_{opt,0^\circ} K(\Phi) \eta_{ric} \quad (1.2)$$

dove i vari fattori rappresentano rispettivamente il rendimento ottico, il modificatore dell'angolo d'incidenza e il rendimento di conversione del ricevitore. Il rendimento ottico a sua volta è il prodotto di alcuni termini:

$$\eta_{opt,0^\circ} = \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \quad (1.3)$$

Il rendimento ottico di picco $\eta_{opt,0^\circ}$ si riferisce alle condizioni in cui i raggi solari sono ortogonali alla superficie ricevente. Questo è il prodotto della riflessività degli specchi ρ , del fattore d'intercettazione γ , della trasmittanza τ e del coefficiente di assorbimento α .

Il fattore d'intercettazione γ è definito come la frazione della radiazione incidente riflessa dagli specchi che raggiunge la superficie del ricevitore. Questo è un valore interessante perché tiene conto di tutte le perdite di non idealità del collettore.

La τ indica la trasmittanza di ogni eventuale superficie che ricopre il ricevitore mentre l' α è il coefficiente di assorbimento della superficie del ricevitore. La valutazione di questi due parametri è complessa perché richiede dei test ottici molto accurati.

Gli ultimi tre parametri esposti variano al variare dell'angolo d'incidenza, per questo nel calcolo del rendimento globale inseriamo il parametro $K(\Phi)$. Esso esprime l'effetto dell'angolo d'incidenza tra raggio e superficie incidente e include le perdite ottiche e geometriche del sistema quando l'angolo d'incidenza dei raggi solari è diverso da 0° . Questo valore varia tra 0 e 1 e per un collettore con inseguimento su due assi questo valore è una costante sempre uguale a 1.

Il rendimento del ricevitore η_{ric} infine esprime il rapporto tra la potenza utile assorbita e la totale incidente sulla superficie del ricevitore. Mentre gli altri sono valori tipici del collettore quest'ultimo rendimento permette il confronto tra le prestazioni termiche di diversi ricevitori.

Tutti questi parametri caratterizzano il tipo di ricevitore e sono degli ottimi indicatori su come è costruito il sistema di collettore più ricevitore e la loro stima permette di individuare le migliori possibili. Il lavoro seguente cerca quindi di definire alcuni dei parametri caratteristici del ricevitore attraverso la misura del flusso concentrato di un ricevitore parabolico. In particolare la prima parte del lavoro proposto ha come obiettivo lo studio e il calcolo della radiazione solare incidente su una determinata area focale. Da queste analisi è possibile ricavare l'andamento della distribuzione di flusso sul ricevitore e calcolare il fattore d'intercettazione. Questi aspetti sono importanti per caratterizzare il collettore in esame, valutare eventuali errori di concentrazione o stimare la producibilità di un sistema simile. La seconda parte del lavoro invece si concentra sulla creazione di un modello termico di un ricevitore piano. Questo modello vuole essere una base per una prima progettazione del ricevitore e per modelli più accurati.

2 METODI DI MISURA DEL FLUSSO CONCENTRATO

La misura del flusso concentrato risulta essere un parametro fondamentale per perseguire l'obiettivo di efficienza nella conversione dell'energia incidente e molto si sta facendo per sviluppare tecniche per la misura accurata del valore di flusso. Nel caso ideale i raggi solari raggiungono parallelamente la superficie riflettente e generano un'ottica ideale. Questa può essere una linea oppure un punto in funzione del tipo di concentratore. Per raggiungere queste condizioni il sole dovrebbe avere una dimensione puntuale ed essere posto a distanza infinita. Nella realtà il disco solare ha una dimensione definita e all'interno della quale si generano i raggi solari, che quindi non sono paralleli tra loro ma incidono la superficie con angoli differenti. La superficie solare, vista dall'elemento puntuale della superficie riflettente, è quindi caratterizzata da un certo angolo solare che rappresenta le direzioni che possono assumere i raggi solari. I raggi incidenti quindi, se riflessi con le leggi dell'ottica geometrica, saranno compresi in un cono in prossimità dell'ottica ideale. Questa la possiamo definire ottica reale del concentratore. Quest'ottica è caratterizzata da una distribuzione del flusso incidente nell'intorno dell'ottica ideale.

Nelle condizioni operative ci sono molti elementi che modificano il flusso solare incidente sulla regione di concentrazione rispetto a quello proveniente dal sole. Per questo la misura della radiazione incidente e della sua distribuzione servono a verificare molte caratteristiche del concentratore. Questi difetti nella distribuzione possono essere causati da problemi nella progettazione dei concentratori o da fenomeni esterni come vento e ombreggiamento. Possono inoltre presentarsi al primo utilizzo perché legati alla progettazione, alla scelta di determinati materiali o al metodo costruttivo. Un esempio è il mancato allineamento tra concentratore e ricevitore che può dar luogo a forti differenze di flusso. Altre volte i difetti compaiono durante l'utilizzo del concentratore e sono dovuti a deformazioni termiche e meccaniche causate dall'azione del vento o da processi d'invecchiamento. Un'altra causa di difetti è il degradamento delle proprietà ottiche del sistema perché con il tempo sulle superfici tendono a depositarsi delle impurità. Queste peggiorano il comportamento di riflessione speculare del raggio a favore di una riflessione diffusa. Infine ci sono dei difetti causati dal metodo o dall'equazione che il concentratore usa per seguire l'andamento dal modello che utilizziamo per caratterizzare il sole. Tutti questi errori ci portano a dire che la distribuzione di flusso solare non sarà mai perfetta e ideale.

I metodi più comuni per mappare il flusso concentrato che verranno presentati di seguito si possono suddividere a seconda delle tipologie dello strumento in sistemi di misura diretto o indiretto[1].

2.1 Metodi Diretti

In questa categoria inseriamo tutte le metodologie che usano strumenti posti sulla regione di concentrazione in grado di dare in uscita un segnale elettrico di risposta associabile direttamente all'irradianza solare incidente sulla superficie misurata.

Radiometri

Sono strumenti che danno una risposta elettrica che varia con la radiazione incidente. Solitamente nei sistemi a concentrazione questi strumenti vengono posizionati sulla regione focale e siccome hanno dimensioni ridotte danno un valore puntuale del flusso misurato. Per questo motivo la misura di un'area può seguire due strade: la prima consiste nell'avere molti sistemi di misura distribuiti e interpolare i risultati ottenuti, la seconda consiste nell'avere un opportuno sistema di movimentazione che spazza l'area desiderata e sul quale sono installati gli strumenti.

Tali dispositivi rilevano la misura del flusso concentrato grazie a dei fotodiodi o delle termocoppie. I primi producono una corrente direttamente proporzionale al flusso di fotoni incidente consentendo la misura diretta del flusso, mentre le termocoppie sono una giunzione tra due semiconduttori che danno in output una differenza di potenziale proporzionale a una differenza di temperatura. I due tipi di strumenti più diffusi sono il Gardon e il Kendall.

Radiometro Gardon

Questo strumento è spesso usato per la misura del flusso concentrato perché molto resistente e semplice. Lo strumento usa una termocoppia differenziale che misura la differenza di temperatura tra il centro e il bordo di una sottile lamina circolare in costantana (Figura 6). Per completare la termocoppia la lamina è poggiata su un dissipatore in rame mentre dal centro di quest'ultima esce un filo anch'esso in rame. A seguito della differenza di temperatura si genera una tensione tra il filo interno e il bordo esterno (Figura 7), e questa differenza di potenziale risulta essere direttamente proporzionale al flusso di calore assorbito. Il radiometro può essere usato per misurare un flusso radiativo o convettivo e può presentare una copertura che limita lo scambio per convezione sulla faccia dello strumento, tuttavia limita anche l'angolo di accettazione della radiazione solare a un valore minore di 180° . Il segnale in uscita deve essere compreso tra i 0 mV e 10 mV perché per tensioni superiori il segnale non è più lineare rispetto al flusso termico incidente e la calibrazione non è più valida, mentre se si eccedono i 20 mV in uscita lo strumento può essere seriamente danneggiato. Questo comporta un limite alla differenza massima di temperatura che la termocoppia può misurare per operare con una risposta lineare. A questa differenza di temperatura è possibile associare un flusso termico massimo che dipende dal raggio e dallo spessore del disco in costantana che influenzano l'accuratezza e le sensibilità dello strumento. Spesso

il foglio di costantana presenta un rivestimento selettivo per migliorarne l'accuratezza mentre per misure di flusso prolungate viene raffreddato da un apposito circuito. Il tempo di risposta di circa mezzo secondo limita la sua velocità di acquisizione a 1 Hz.

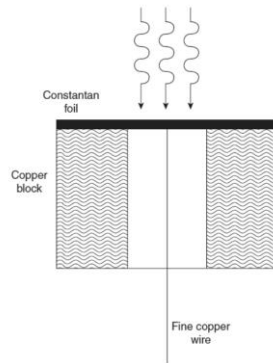


Figura 6 Radiometro Gardon [1]

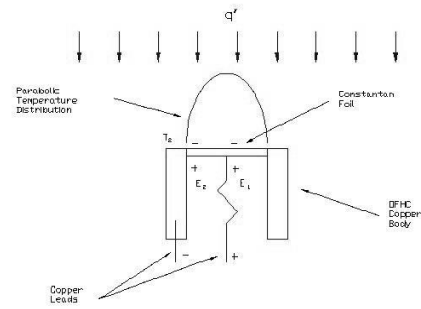


Figura 7 Andamento della temperatura sul radiometro Gardon. Vattel corporation

Solitamente la calibrazione di questi strumenti avviene all'interno di un corpo cilindrico a doppia cavità costituito da un elemento in grafite riscaldato elettricamente in grado di emettere a temperatura variabile (Figura 8). La temperatura interna è misurata inserendo in una estremità un pirometro molto accurato mentre nell'altra estremità si inserisce lo strumento da calibrare. La temperatura massima raggiunta dal corpo nero durante la calibrazione è di 850°C e, come mostrato da Ballestrin et al. [2], questo introduce un errore nella calibrazione che dipende dal tipo di rivestimento superficiale dello strumento. Il motivo è che la superficie si comporta diversamente quando è esposta allo spettro di emissione del corpo in grafite a 850°C, che è diverso dallo spettro solare. In Figura 9 è possibile osservare lo spettro solare preso per un certo valore di massa d'aria (AM) e lo spettro del corpo nero a 850°C. Oltre a questi valori vengono riportati i coefficienti di assorbimento della grafite colloidale e di una vernice nera. Dall'immagine è possibile osservare che lo spettro solare e il corpo nero a 850°C emettono la maggior parte della loro energia in lunghezze d'onda diverse. Questo influenza la calibrazione quando il rivestimento selettivo applicato varia molto il suo coefficiente di assorbimento al variare della lunghezza d'onda dello spettro.

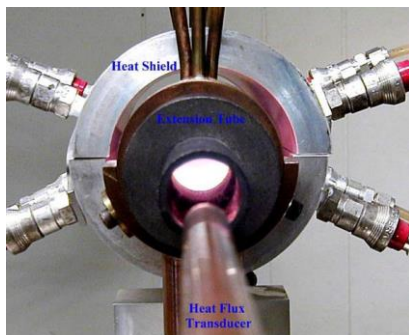


Figura 8 Particolare del corpo cilindrico a doppia cavità. Ballestrin et al. [3]

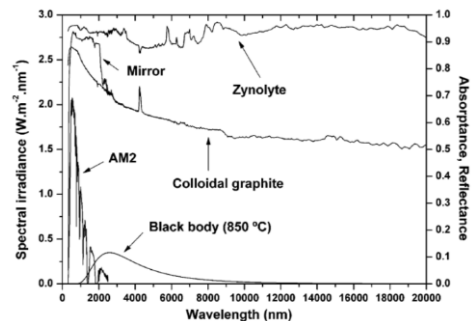


Figura 9 Spettri della radiazione solare a AM2 (air mass) e del corpo nero a 850°C e coefficiente di assorbimento di due rivestimenti. Ballestrin et al. [2]

Nello studio si sono analizzati un rivestimento in Zynolite e uno in grafite colloidale evidenziando l'errore del 3.6% nel primo caso e 27.9% nel secondo caso. Per correggere questo errore si suggeriscono dei fattori correttivi che moltiplichino la costante di calibrazione del costruttore. Questa infatti esprime la relazione tra il segnale in tensione e il flusso termico. Un metodo di calibrazione alternativo presentato da Ballestrin et al. [3] propone una calibrazione basata sull'uso dello strumento come calorimetro. La particolare configurazione consiste nell'inserire lo strumento in un guscio di acciaio inossidabile opportunamente isolato per limitare le dissipazioni termiche. Il flusso di calore viene ceduto al fluido che scorre all'interno grazie alle ottime proprietà conduttive del rame di cui è composto il corpo principale, permettendo di stimare il flusso assorbito nota l'area frontale dello strumento. Le temperature del flusso sono misurate con delle termoresistenze Pt100 mentre una termocoppia da la temperatura dell'isolamento.

La calibrazione in questo caso consiste nel porre lo strumento in prossimità di una piastra in grafite che irradia a una determinata temperatura. La temperatura della piastra è misurata da un pirometro e una volta stabilizzata al valore desiderato viene rapidamente posizionato lo strumento in prossimità di questa. La distanza deve essere tale da limitare gli scambi termici convettivi. La procedura viene fatta per varie temperature della piastra non prima però di aver fatto raffreddare il sensore.

Le due tecniche di calibrazione mostrano un buon accordo dei risultati. Nel caso del metodo con calorimetro utilizzando, un'opportuna portata di fluido di raffreddamento, si osserva un'incertezza del 2% che è minore dell'incertezza del 3% ottenuta con il primo metodo. Inoltre utilizzando la calibrazione con metodo del calorimetro si ottiene una migliore ripetibilità. Nota negativa di quest'ultimo tipo di calibrazione è il range limitato a 100 kW m^{-2} .

Radiometro Kendall

Questo strumento è stato sviluppato dalla NASA- Jet Propulsion Laboratories (JPL) principalmente per il rilevamento dell'intensità solare ed è quindi molto preciso per le lunghezze d'onda dello spettro solare. In esso, la radiazione incidente viene diretta in una cavità che presenta caratteristiche elevate di assorbimento della radiazione tanto da poter avvicinarsi al comportamento di un corpo nero. Le pareti della cavità sono collegate al pozzo caldo di una termopila dando un voltaggio proporzionale alla differenza di temperatura tra il pozzo caldo e le pareti. Il vantaggio di questo strumento è che ha un'incertezza molto bassa pari allo 0.3% e per questo viene usato spesso per calibrare altri radiometri tuttavia presenta un tempo di risposta elevato di 7s che non lo rendono adatto a misurazioni rapide.

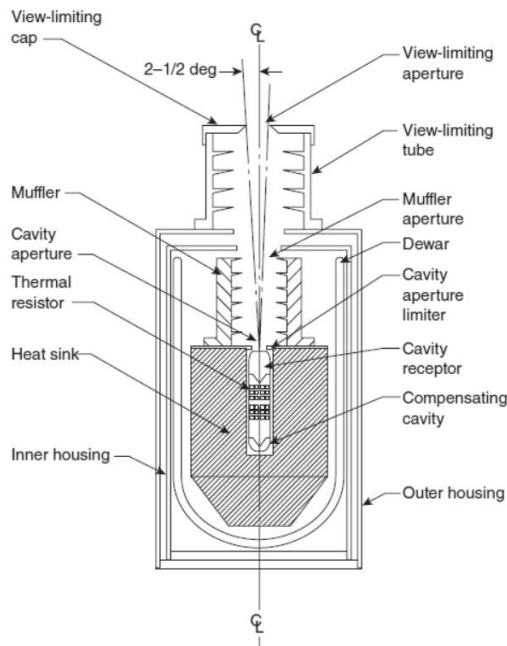


Figura 10 Radiometro Kendall [1]

Cavity radiometer

È un tipo di strumento per la misura della radiazione diretta del flusso e usa un fotosensore per la misura della radiazione incidente. Spesso si usa un fotodiode posto all'interno dello strumento ma potrebbero essere usate anche delle celle fotovoltaiche. Il principale problema dei fotosensori è che hanno un limite massimo di flusso incidente a cui possono essere sottoposti, tuttavia le loro caratteristiche principali sono una risposta rapida, una linearità della risposta al variare del flusso e, non ultimo, un costo molto contenuto. Al fine di sfruttare queste caratteristiche è stata creata una sfera d'integrazione in grado di attenuare il flusso concentrato. La sfera integratrice (Figura 11) è un dispositivo ottico composto da una sfera cava caratterizzata da un rivestimento che riflette la radiazione in modo diffuso (coefficiente di riflessione diffusa di 0.98-0.99). I fotoni entrano in una piccola apertura e incontrano la prima porzione di sfera, detta area di primo impatto, e successivamente vengono riflessi più volte dalla superficie interna prima di essere catturati dal fotosensore. In realtà parte dei fotoni verranno assorbiti dalla superficie, mentre al tempo infinito tutti i fotoni saranno assorbiti. Questo si ripete per ogni fotone che a vari istanti entra nella sfera. Il fotosensore non deve essere posto nell'area di primo impatto per non vedere direttamente il flusso incidente. La trattazione di questo fenomeno è complessa e per un approfondimento si rimanda al modello presentato da Rivoire [4], che lega l'intensità di emissione della superficie al flusso termico incidente con un modello di riflessione multipla di fotoni.

Un aspetto interessante è che lo strumento è indipendente dall'angolo medio d'incidenza dei raggi che caratterizza i collettori solari a concentrazione. Se i flussi solari sono elevati il corpo dello strumento è raffreddato ad acqua e, anche in questa configurazione lo strumento si presenta molto compatto e facile da maneggiare. Il principale punto

negativo, come mostrato dagli stessi autori, è la degradazione delle proprietà riflessive della superficie interna e pertanto lo strato deve essere sostituito spesso e bisogna monitorare l'accuratezza dello strumento tramite comparazione con uno strumento di riferimento. L'accuratezza di questo strumento è del 5%

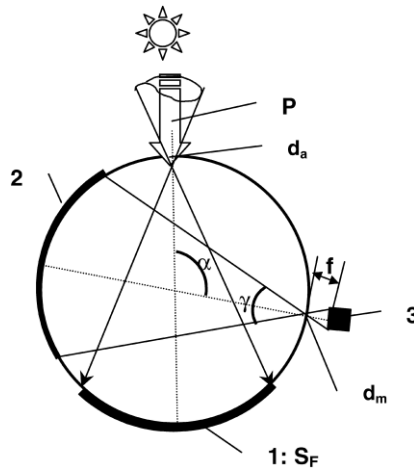


Figura 11 Cavity radiometer. [4]

Peretta et al [5] hanno presentato uno sviluppo del precedente strumento che consiste in un radiometro a doppia cavità. Lo strumento è composto da due sfere d'integrazione disposte in serie tra loro in modo che i fotoni interagiscano con entrambe prima di raggiungere il fotodiode (Figura 12). La prima sfera integratrice raccoglie il flusso entrante e lo attenua prima che esso raggiunga la seconda sfera integratrice che contribuisce ulteriormente a diffondere i fotoni. Uno dei principali vantaggi di questo sensore è la sua flessibilità; infatti è possibile variare sia l'area di apertura verso l'esterno che tra le sfere d'integrazione in maniera da adattare lo strumento a vari rapporti di concentrazione del collettore. Come ulteriore miglioria sono stati messi degli schermi interni, anch'essi regolabili in funzione del rapporto di concentrazione, per essere sicuri che il flusso entrante non raggiunga direttamente il sensore.

Gli autori hanno anche sviluppato un modello ottico del radiometro a doppia cavità implementando un codice di ray-tracing e un modello termico. Il modello ottico è stato validato con una calibrazione utilizzando una lente Fresnel che ha concentrato il flusso derivante da un simulatore solare. Le misure sono state confrontate poi con quelle ottenute utilizzando una cella fotovoltaica posta nello stesso sistema ottenendo valori in grado di validare il modello ottico.

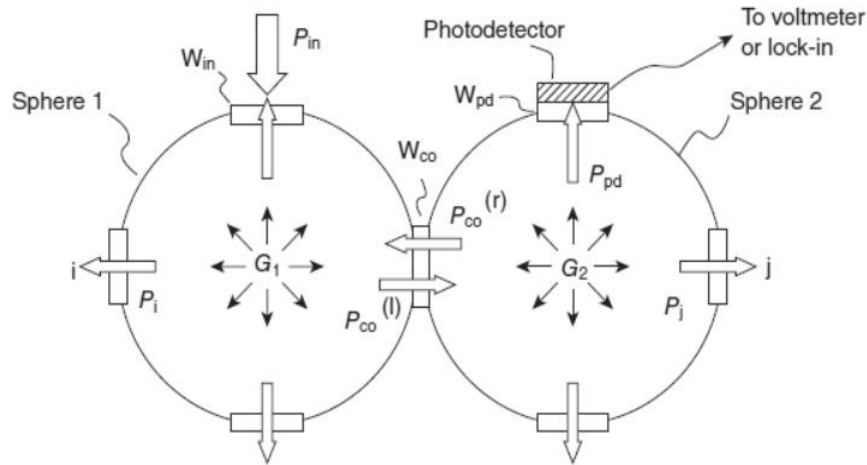


Figura 12 Double cavity radiometer (Parretta et al.,2007 [5])

PARASCAN

E' stato realizzato in Germania all'istituto di termodinamica tecnica dal centro aerospaziale tedesco (DLR) e si tratta di uno strumento pensato per ricevitori tubolari e collettori parabolici lineari. Lo strumento, costituito da una serie di fotodiodi disposti in due matrici dalla forma semicircolare, si muove lungo un telaio che fa da guida e scansiona in questo modo tutta l'area focale. Una matrice di fotodiodi intercetta la totale energia incidente sull'area di concentrazione mentre la seconda matrice intercetta tutta la luce persa dal ricevitore. Un'applicazione è stata presentata in [6] effettuando misure con questo strumento e mettendo a confronto i risultati con quelli acquisiti con una CCD camera ottenendo valori di fattori di intercettazione confrontabili. I principali limiti derivano dal fatto che i fotodiodi sono comunque un numero limitato e pertanto non danno una mappatura completa, inoltre i fotodiodi stessi sono meno accurati di altri sistemi di rilevamento. Ciò nonostante questo strumento presenta delle ottime caratteristiche tanto da poter essere impiegato su grandi impianti di potenza.

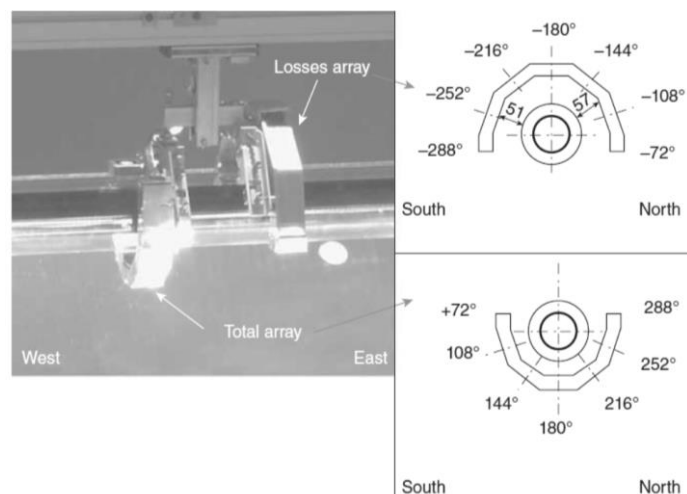


Figura 13 PARASCAN system [6][1]

Heat flux microsensor

Anche questi strumenti fanno parte della famiglia dei radiometri e in questo caso l'elemento sensibile è una termopila realizzata con la tecnica di sputtering e pertanto presenta uno spessore molto ridotto. L'elemento base delle termopila è la termocoppia costituita di solito dall'accoppiamento di rame e costantana. Per formare la termopila vengono collegate in serie molte termocoppie per ampliare l'output in tensione. Nella termocoppia vengono quindi a crearsi molte giunzioni di questi due metalli e alcune formano il giunto caldo posto a temperatura maggiore, mentre le altre il giunto freddo. Nell'HFM il giunto caldo si trova sulla faccia del sensore, quello freddo appena sotto lo strato di materiale isolante che li separa. Questo strato isolante è sensibile alla temperatura di esercizio perché varia la sua conduttività termica al variare della stessa. Per questo motivo allo strumento viene accoppiata una termoresistenza a film sottile in platino per misurare la temperatura superficiale e considerare gli effetti che ha sulla misura del flusso, inoltre essa è anche molto utile per valutare le dissipazioni termiche. Questo sensore può presentare una copertura superiore per misurare solo il flusso termico radiativo, riducendo l'angolo di accettazione della radiazione solare, e un corpo raffreddato ad acqua per misure continue ad elevate temperature. Nella sua forma più semplice invece è in grado di misurare tutti i tipi di flusso termico. Lo spessore dello strumento è molto ridotto ed è di circa $2\ \mu\text{m}$ e, come conseguenza, anche il tempo di risposta risulta molto basso ($300\ \mu\text{s}$) e questo lo rende uno strumento adatto a misurare anche fenomeni molto rapidi. I limiti dello strumento sono la temperatura superficiale che non può eccedere gli 800°C per evitare di danneggiarlo mentre, per quanto riguarda il flusso, non ha limiti superiori se non quelli imposti dalla temperatura. Tuttavia il flusso ha un limite inferiore di $1000\ \text{W/m}^2$ al di sotto del quale lo strumento non è molto accurato. Spesso questi tipi di sensori hanno un rivestimento superficiale come i radiometri gardon e vengono calibrati allo stesso modo presentando incertezze dell'ordine del 3%.

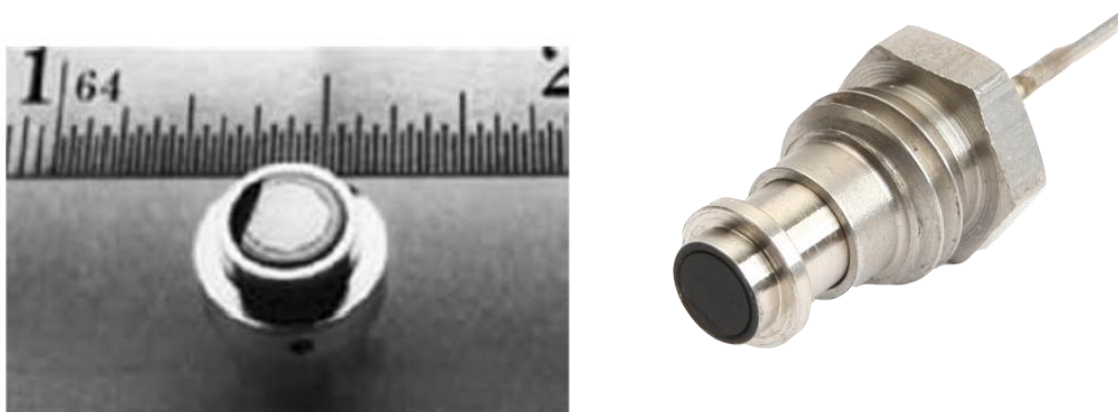


Figura 14 heat flux microsensor [1]

Sensori di questo tipo sono stati testati sull'area del ricevitore volumetrico Hitrec II montato sulla torre solare di Almeria [7][8]. L'area del ricevitore ha un'altezza di 80 cm e una larghezza di 60 cm. Il sistema di misura è di tipo ibrido perché presenta, oltre alla

tecnica diretta, una tecnica di misura indiretta del flusso sul ricevitore. Relativamente alla parte di misura diretta l'area del ricevitore viene misurata da una barra mobile verticale sulla quale sono alloggiati i microsensori. La loro disposizione sulla barra è tale da avere un maggior numero di microsensori nella parte centrale della barra che scandisce l'area centrale del ricevitore e dove ci si aspetta un flusso termico maggiore. La barra spazza l'area ruotando su un perno posto sotto l'area del ricevitore lungo l'asse di simmetria del lato più corto. Oltre alla barra sono presenti due aste metalliche che gli autori chiamano hot fingers le quali servono a definire la velocità di rotazione della barra. Queste sono posizionate sopra la barra mobile in modo che, durante il movimento, la barra venga coperta dagli hot fingers che generano un picco negativo rilevato dai microsensori. Campionando i valori di flusso ad una certa velocità è possibile stimare la velocità di rotazione della barra. Dei dati raccolti viene fatta un'interpolazione per avere una misura del totale flusso incidente con valori di incertezza totale di $\pm 6\%$.

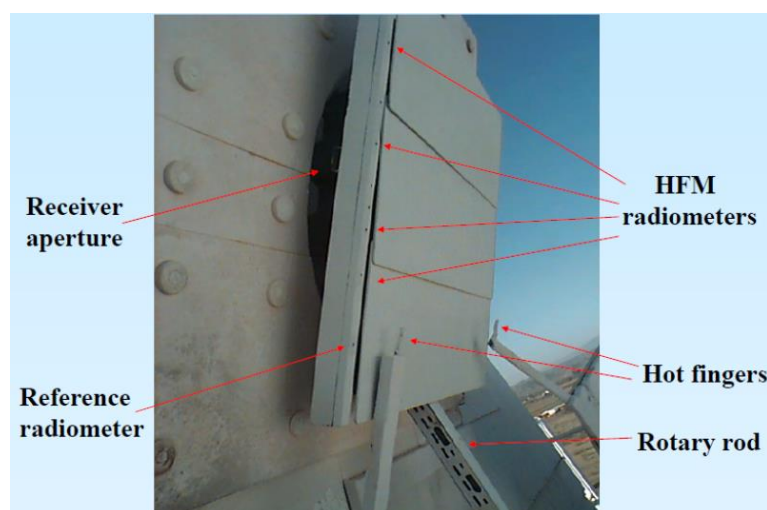


Figura 15 Sistema ibrido per la mappatura del flusso solare posto sul ricevitore Hitrec II sulla torre solare di Almeria. Ballestrin 2002 [7]

Calorimetri

Questi tipi di strumenti possono essere posizionati direttamente nella regione focale e basano il loro funzionamento sul calcolo del flusso di calore asportato dallo strumento attraverso il deflusso di un fluido al loro interno. Il contatto fluido-piastra scaldante deve essere ottimizzato e le dissipazioni verso l'esterno limitate. In questo modo è possibile associare il flusso incidente al flusso di calore asportato dal fluido termovettore.

Le misure necessarie sono le temperature di ingresso e di uscita del fluido ed eventualmente la temperatura della superficie ricevente per stimare l'eventuale perdita di calore di quest'ultima. Le dimensioni di questi strumenti, se confrontati con quelli esposti in precedenza, sono abbastanza grandi e pertanto non possono offrire una distribuzione spaziale molto accurata della regione focale. Il vantaggio principale è che non hanno limiti particolari di utilizzo e, per questo, vengono utilizzati in ricevitori puntuali dove l'elevato flusso di calore potrebbe danneggiare altri strumenti. Uno dei più semplici

calorimetri (Figura 16) è composto da un piatto metallico raffreddato da un fluido come mostrato da Estrada et al. [9], che ne hanno proposto un'applicazione in un concentratore puntuale. La piastra piana in acciaio dello spessore di 5 mm funge da ricevitore e poggia su un corpo anch'esso in acciaio. All'interno un distributore favorisce il deflusso dell'acqua in prossimità della piastra ricevente. In questa particolare applicazione la piastra ricevente presentava delle termocoppie disposte sulla superficie come mostrato in Figura 17. Questo ha permesso, attraverso la raccolta puntuale della temperatura, di creare un modello per la distribuzione del flusso sull'area del ricevitore. In un'altra applicazione i risultati ottenuti usando lo stesso calorimetro descritto in precedenza[10] sono stati confrontati con quelli ottenuti da altri tre strumenti posti sullo stesso ricevitore puntuale. Si evince che i risultati ottenuti con il calorimetro sono in accordo con gli altri dimostrando la validità dei calorimetri per il calcolo del flusso concentrato.

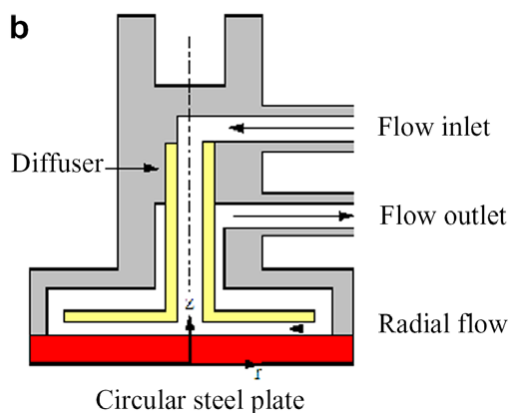


Figura 16 Calorimetro planare. Estrada et al. [9]

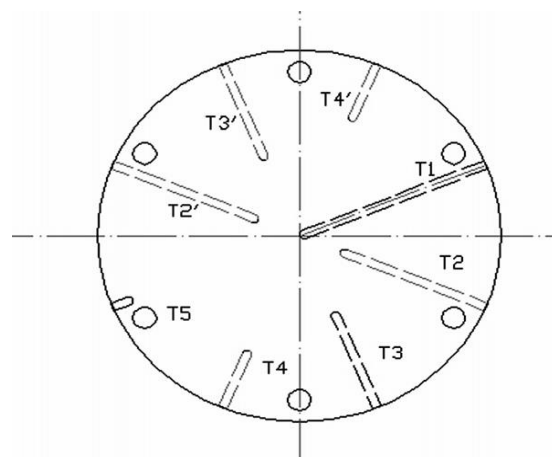


Figura 17 Disposizione delle termocoppie nella superficie ricevente del calorimetro planare. [9]

Altri ricevitori hanno geometrie più studiate e ottimizzate per la misura del flusso concentrato. Un esempio è il calorimetri CAVICAL montato sul ricevitore puntuale DEFRAC sviluppato nell'università del Messico[11]. Questo particolare tipo di calorimetro è costituito da un cono in rame inserito in un altro cono in acciaio e posizionati in maniera tale da lasciare un canale di passaggio intermedio. In questo spazio scorre l'acqua che percorre il canale dalla parte superiore del cono in rame fino alla base da cui esce. Sul cono più interno sono disposte delle termocoppie per misurare l'andamento della temperatura interna com'è possibile vedere in Figura 18. Le dispersioni termiche verso l'esterno vengono limitate da un opportuno strato isolante che ricopre il cono in acciaio.

L'idea di base è che il cono interno funzioni come un corpo nero assorbendo tutta la radiazione incidente ma in realtà parte della radiazione entrante è persa per riflessione, per emissione della superficie stessa e per convezione verso l'esterno. Per questo il design dell'apertura alla base fatto con Monte Carlo ray-tracing ha come obiettivo principale la diminuzione di queste perdite. Per verificare lo strumento è stato fatto un confronto tra il modello numerico in FLUENT e le misurazioni fatte [11]. In particolare il modello riesce

a predire bene la distribuzione della temperatura superficiale interna misurata dalle varie termocoppie. Sulla base delle misurazioni che sono state fatte si vede uno scostamento massimo di 2 K su 360 K raggiunti con il massimo flusso incidente.

Altri esempi di calorimetro a doppio cono con geometria ottimizzata sono il SunCatch e il successivo SunCatch II sviluppati nell'istituto DLR di Colonia. Questi strumenti sono composti da un cono in rame sul quale sono ricavati dei condotti per il raffreddamento come riportato nella Figura 19.

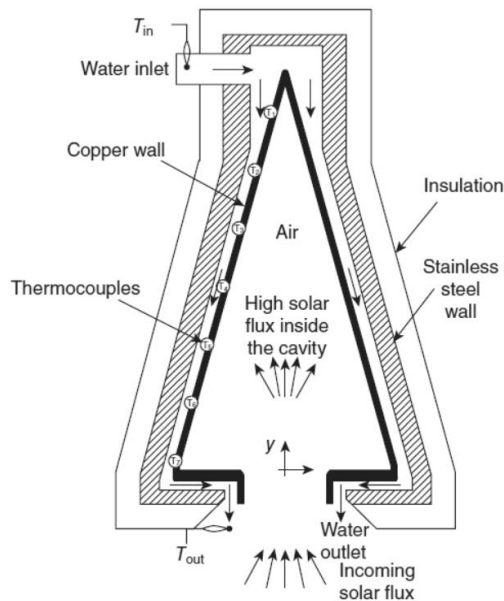


Figura 18 CAVICAL calorimeter. Perez-Rabago, 2006 [11]

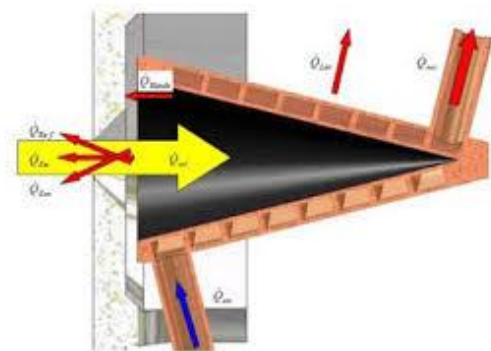


Figura 19 Calorimetro SUNCATCH

2.2 Metodi Indiretti

Con questo termine si indicano tutti gli strumenti di misura del flusso termico che non hanno bisogno di essere posizionati direttamente nella regione focale. La misura viene fatta a una certa distanza e spesso si usa una CCD (charge coupled device) camera.

Camera target method

E' un metodo di misura indiretta del flusso ma offre una buona risoluzione spaziale e permette la misura di zone con elevati rapporti di concentrazione senza bisogno di raffreddare lo strumento. Per effettuare la misura bisogna posizionare un' apposita piastra ricevente sulla regione focale la quale deve essere in grado di riflettere la radiazione ricevuta. Il comportamento del bersaglio dovrebbe essere quello di una superficie lambertiana in grado cioè di diffondere la luce allo stesso modo in ogni direzione. Per raggiungere queste caratteristiche il materiale solitamente utilizzato è l'allumina.

L'utilizzo delle superfici lambertiane è problematico per concentratori ad alto rapporto di concentrazione perché l'elevato flusso incidente degrada rapidamente il rivestimento superficiale. Per risolvere queste problematiche il ricevitore lambertiano deve essere opportunamente raffreddato. In alternativa si potrebbe utilizzare un sistema mobile nell'area di misura; catturare varie immagini del ricevitore nelle diverse posizioni ed elaborare i dati a posteriori per ottenere la distribuzione di flusso.

La luce riflessa dal bersaglio è catturata utilizzando una camera (di solito CCD-charge copuled device) con la quale è possibile avere un'immagine della distribuzione del flusso nell'area del ricevitore. In realtà questa immagine da una distribuzione di densità di flusso relativa della piastra ricevente che deve essere calibrata usando un sistema di misura assoluto del flusso. Serve pertanto un metodo di misura diretto posto in prossimità della regione focale che ci permetta di avere una stima puntuale del flusso e correlare questo valore alla scala di grigi che si ottiene dalla CCD camera.

Il principale vantaggio di questi metodi è che permettono di fare misure lontano dalla regione focale con una buona risoluzione e con tempi di acquisizione molto brevi. Un esempio di applicazione è stato misurare il flusso incidente sul ricevitore posto in cima alla torre solare di Almería [12]. Il sistema di misura è stato descritto in precedenza e si compone di una barra sulla quale sono stati posizionati dei microsensori per la misura diretta del flusso. Sfruttando la movimentazione della barra si integra una superficie lambertiana mobile che spazza la sezione del ricevitore. Due radiometri Gardon posti in prossimità dell'area ricevente sono il riferimento per le immagini in scala di grigi della camera. Questo studio ha mostrato che i valori di flusso ottenuti con metodo diretto e indiretto sono confrontabili, permettendo inoltre di validare entrambi i metodi.

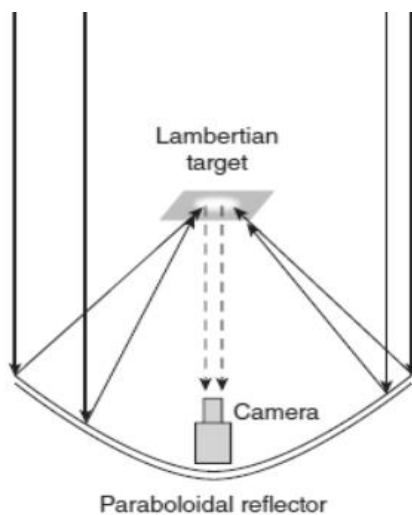


Figura 20 Camera-target method

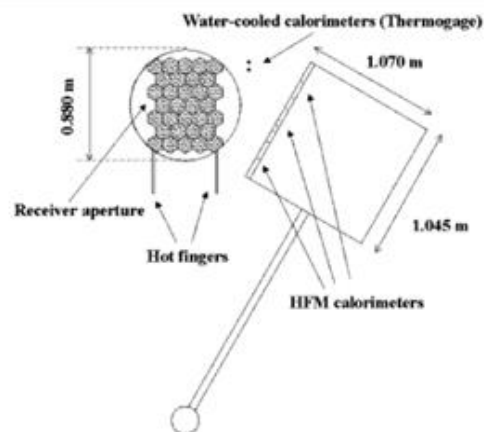


Figura 21 Sistema ibrido rotante di Ballestrin e Monterreal (2004) costituito da una barra con microsensori e un obiettivo bianco lambertiano per la misura indiretta del flusso [8]

Un altro sistema ibrido simile al precedente è stato testato in un ricevitore parabolico a fuoco lineare. In questo caso oltre alla misura effettuata utilizzando il PARASCAN si utilizza un obiettivo lambertiano montato ortogonalmente all'asse del ricevitore (Figura 22) che riflette le immagini verso una camera opportunamente calibrata. Questo obiettivo

può essere spostato lungo il ricevitore con un braccio telescopico. Il metodo di misura risulta molto semplice e intuitivo in quanto permette visivamente di identificare le perdite ottiche e le diverse concentrazioni di flusso. Per ottenere tali valori è necessario calibrare opportunamente la camera includendo il raddrizzamento delle immagini e la correzione dello sfondo. Questo perché bisogna tenere conto della radiazione diretta che raggiunge il ricevitore tubolare ma che non è stata riflessa dagli specchi. Lo studio ha messo in evidenza come l'uso di un metodo indiretto possa essere utilizzato per validare le mappe ottenute da un metodo diretto.

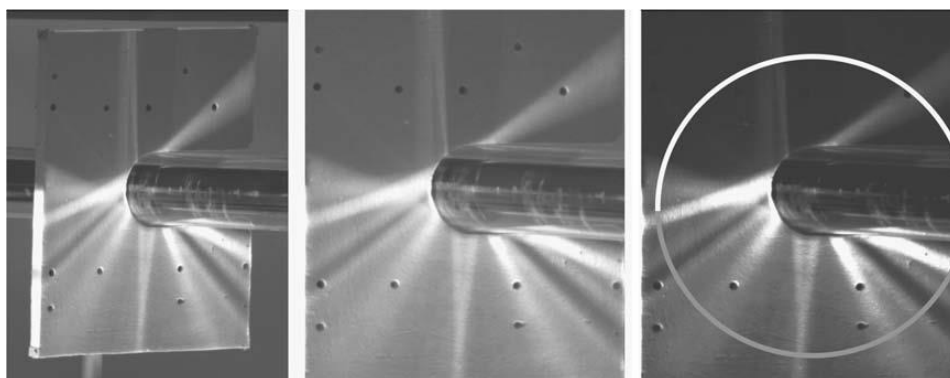


Figura 22 Ricevitore lambertiano posto ortogonalmente all'asse del ricevitore per la misura indiretta del flusso solare incidente tramite CCD camera. Riffelmann et al. 2006 [12]

Se non si vuole utilizzare una superficie riflettente si possono utilizzare delle fibre ottiche per direzionare il flusso solare verso la camera. Questo è il caso del PARASCAN 2 dove sono state utilizzate delle fibre ottiche posizionate al posto dei fotodiodi del precedente sistema PARASCAN. Successivamente le fibre trasferiscono il flusso lontano dal fuoco dove viene filtrato prima di poter essere catturato dalla camera (Figura 23). Questa configurazione permette la calibrazione del sistema direttamente sotto la luce solare che lo illumina omogeneamente inoltre la dimensione delle fibre (0.125 mm), inferiore rispetto a quella dei fotodiodi (3.5 mm), permette una risoluzione migliore. Questo strumento è stato usato [13] per la verifica del ray-tracing code model identificando i parametri ottici del collettore in esame. In particolare si è analizzato il fattore d'intercettazione ottenendo valori coerenti con il modello numerico sviluppato.

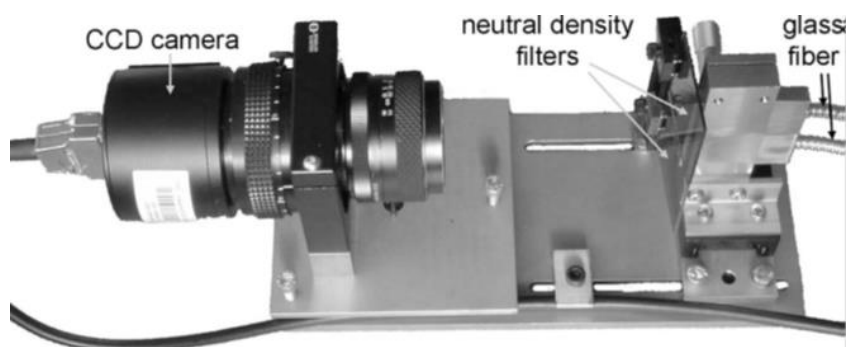


Figura 23 Camera e fascio di fibre dello strumento PARASCAN 2 [13]

3 MODELLI OTTICI

Questi sono strumenti di simulazione numerica del flusso solare concentrato che devono essere validati attraverso i metodi di misura esposti precedentemente. Attraverso questi strumenti è possibile ottenere una prima stima della potenza incidente sulle varie componenti del collettore grazie alla creazione di modelli di ray-tracing in grado di predire il comportamento dei raggi solari incidenti sulla geometria implementata. Per poter risolvere questo problema i modelli utilizzano di solito il metodo Monte Carlo, che prende il nome dallo stato omonimo nel sud della Francia e fa parte della famiglia dei metodi statistici non parametrici. Viene utilizzato per risolvere problemi matematici che presentano un numero elevato di variabili traendo delle stime attraverso delle simulazioni. Tali strumenti sono in grado di considerare una serie di aspetti del ricevitore che vanno dalla geometria dello stesso fino a imperfezioni del materiale o del metodo di puntamento del collettore. Tutti questi parametri sono definiti con delle funzioni di probabilità le quali vengono poi combinate tra loro per creare la funzione di probabilità che ha il problema in esame.

Per capire meglio il funzionamento descriviamo com'è possibile modellare il sole. Il disco solare infatti ha una certa dimensione e i raggi non sono tra loro ortogonali e incidono la superficie con angoli differenti. Per considerare questi parametri bisogna definire come si dispone la generazione di potenza all'interno del disco solare. Il risultato è che i raggi generati dal nostro modello devono seguire una certa distribuzione di probabilità di essere generati in una zona del disco solare. I primi modelli utilizzavano una distribuzione dell'intensità solare di tipo gaussiano nell'area solare. Successivamente sono stati implementati caratterizzando il sole con una componente associata all'effettiva dimensione del disco solare e una associata alla regione circumsolare. In questo modo è possibile trovare molte curve di distribuzione a differenti rapporti circumsolari, ovvero in funzione del tipo di giornata che si presenta. Di solito si usano delle distribuzioni che rappresentano le condizioni di cielo sereno.

Un altro esempio di errori che è possibile implementare sono le funzioni di riflessione bidirezionali (BRDF Bidirectional Reflection Distribution Function) che definiscono il comportamento della superficie riflettente. Tra i molti errori che possono essere implementati citiamo il disallineamento degli specchi, cedimento o distorsione degli stessi dovuta alla gravità o al vento, espansione termica e problemi costruttivi o di tolleranza. Il problema è che ognuno di questi errori deve essere misurato sperimentalmente e aggiunto al modello per fare un'ottimizzazione dello stesso, mentre con uno strumento di misura della radiazione concentrata si ottiene un risultato in un caso di applicazione reale del collettore.

In conclusione, sebbene questi strumenti siano molto precisi, la realtà può presentare comportamenti diversi del collettore poiché si inseriscono una serie di incertezze non note a priori. Per questo la misura del flusso concentrato è un passo importante per lo sviluppo e l'ottimizzazione di modelli per i collettori a concentrazione e valutare la potenza termica incidente sul ricevitore serve a valutare le capacità reali. Ottenendo inoltre una

distribuzione spaziale del flusso e confrontandola con i valori ottenuti da metodi di ray-tracing è possibile effettuare l'analisi costruttiva del sistema. Questo permette di osservare deformazioni o disallineamenti degli specchi che possono produrre delle riduzioni anche importanti del rendimento complessivo del sistema.

4 SISTEMA DI MISURA SCELTO

Lo strumento preso in esame per lo studio del nostro PTC (Parabolic trough collector) è un micro sensore di flusso termico HFM-7E/L della Vatec Corporation. Come riportato in precedenza questo strumento presenta caratteristiche interessanti di accuratezza e tempo di risposta molto limitato. Il costruttore dichiara un tempo di risposta di $17\mu\text{s}$ per lo strumento senza rivestimento inoltre la sua dimensione contenuta ci permette una misura quasi puntuale del flusso.



Figura 24 Sensore di flusso termico Vatec HFM-7E/L con corpo di raffreddamento in rame (Vatec Corporation 2015)

Le caratteristiche dichiarate dal costruttore per lo strumento preso sono[14]:

	HFM-7 E/L (low temperature)
Max. face temperature ($^{\circ}\text{C}$)	300
Uncoated response time (μs)	17
Coated response time (μs)	300
Min. HFM sensitivity ($\mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}$)	150
HFM impedance ($\text{k}\Omega$)	3.5
Thermopile	Nichrome/costantan
Temperature sensor	Platinum RTD
Temperature sensor sensitivity	0.25-0.35 ($^{\circ}\text{C}/\Omega$)
Temperature sensor resistance (Ω)	100-200
Housing	Copper
Wiring	Teflon

Lo strumento permette di ottenere contemporaneamente due misure [15] grazie alla presenza di una termoresistenza per una misura di temperatura e una termopila per la misura di una differenza di temperatura alla quale si può associare una misura di flusso.

La termopila è costituita da un film sottile inferiore ai 2 μm composto da moltissime giunzioni termoelettriche rame-costantana. In Figura 25 è possibile vedere la composizione delle termopila costituita dai due metalli caratteristici della termocoppia rame-costantana e dal sottile strato isolante. Grazie a questo strato isolante si crea una differenza di temperatura che viene letta dagli strumenti come differenza di voltaggio mentre la polarità del segnale indica il verso del flusso termico.

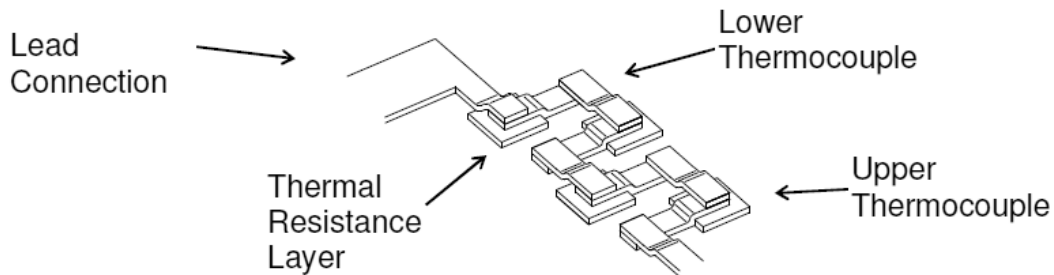


Figura 25 Particolare della Termopila componente il micro sensore preso in esame [14]

La temperatura superficiale viene definita da una termoresistenza (RTS) ottenuta per deposizione di un sottile strato di platino sul bordo esterno del sensore. La misura serve a considerare l'effetto di variazione di conducibilità dell'isolante al variare della temperatura. Questo perché influenza la misura di flusso come è possibile vedere dalle equazioni esposte in seguito. In alcune applicazioni la misura della temperatura superficiale è utile per il calcolo del coefficiente di scambio convettivo e le perdite per irraggiamento, oppure per stimare un cambio nella calibrazione del sensore di flusso.

La superficie ricevente del sensore è rivestita da un sottile strato di Pyromark 1200 che, a differenza della vernice Zynolite, 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 μm e 14 μm) è superiore a 0.93. Il rivestimento del sensore è consigliato per misure di flusso termico radiativo. In presenza del rivestimento la risposta del sensore è pari a 300 μs .

4.1 Output del sensore

Come detto, con lo strumento si effettuano misure di flusso e di temperatura e entrambe le misure devono essere fatte perché la differenza di voltaggio che esce dalla termopila è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura misurata sull'isolante. Questa differenza di temperatura dipende dal flusso termico che attraversa lo strato isolante ed è quindi influenzata dalla resistenza termica data dall'isolante. In particolare al variare della

temperatura varia la conduttività dell'isolante, pertanto non tenerne conto falserebbe le misure di flusso. La termoresistenza dà un output in temperatura dalla seguente formula:

$$T = aR^3 + bR^2 + cR + d \quad (4.1.1)$$

dove:

- T Temperatura [°C]
- a,b,c,d sono costanti di calibrazione dello strumento e sono fornite dal costruttore
- R è la resistenza della termoresistenza [Ω]

Il calcolo della misura di resistenza della RTS viene fatto con la seguente formula:

$$R = \frac{V_{RTS}}{I_{RTS} \cdot G_{RTS}} + R_0 \quad (4.1.2)$$

dove:

- V_{RTS} è la tensione di output in uscita dalla termoresistenza
- I_{RTS} è la corrente di output della termoresistenza
- G_{RTS} è il guadagno dell'amplificatore ma, nel nostro caso non c'è quindi ha valore unitario

R_0 è la resistenza mostrata dalla RTS durante la calibrazione pertanto si calcola nel modo seguente:

$$R_0 = e \cdot T_0 + f \quad (4.1.3)$$

dove:

- e costante di calibrazione dello strumento
- f costante di calibrazione dello strumento
- T_0 Temperatura alla quale lo strumento è stato calibrato [°C]

Il flusso termico incidente viene dedotto dalla seguente equazione:

$$q'' = \frac{\frac{V_{HFS}}{I_{HFS}}}{g \cdot T + h} \quad (4.1.4)$$

dove:

- g,h sono le costanti data dal certificato di calibrazione dello strumento

Dati della calibrazione [16]

COEFFICIENTE	VALORE	UNITA
a	0.0	$*10^{-5}$
b	0.0	$*10^{-3}$
c	3.501445	$^{\circ}\text{C}/\Omega$
d	-399.239	$^{\circ}\text{C}$
e	0.285596	$\Omega/^{\circ}\text{C}$
f	114.0214	Ω
g	0.369917	$\mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2/^{\circ}\text{C}$
h	308.6219	$\mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2$

Otteniamo inoltre i seguenti valori utili per una rapida verifica prima della misura
Resistenza del sensore di temperatura(RTS)

- Resistenza a 23°C: 121 Ω
- RTS calibrata a 30°C-180°C

Heat Flux Sensor (HFS)

- Resistenza a 23°C: 4.44 k Ω
- HFS calibrato a 42.597 W/cm^2

4.2 Il sistema di concentrazione

Il concentratore solare parabolico a fuoco lineare (PTC) preso in esame si trova nel laboratorio CoEnSo (Conversione di Energia Solare) del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Padova. Il collettore di tipo asimmetrico (Figura 26) è composto da quattro specchi che formano un segmento di parabola in grado di muoversi su due assi. Il sistema concentra su una linea focale di 2.4 m di lunghezza alla distanza focale di 1.81 m mentre gli specchi formano un angolo di bordo di 78° rispetto al fuoco lineare. La superficie vetrata presenta un'altezza di 2.91 m. L'area totale risulta essere di 6.86 m². I quattro specchi disposti su due file godono di eccellenti proprietà riflettive dichiarate dal costruttore, con un coefficiente di riflessione della radiazione normale incidente pari al 96.1%.

Il sistema di inseguimento solare a due assi permette di avere dei raggi solari che incidono sempre normalmente l'area di apertura e, in questo modo, si evitano tutte le perdite ottiche relative alla non perpendicolarità dei raggi solari. Il sistema di controllo si basa sull'uso di un algoritmo solare implementato e su un sensore ottico di luminosità che permette un ulteriore aggiustamento della posizione del concentratore ottenendo alla fine una precisione di allineamento inferiore a 0,2°.



Figura 26 Prototipo di concentratore solare parabolico lineare

Oltre al collettore sono presenti un datalogger Agilent 34970A che acquisisce i dati e un Pc per monitorare il tutto.

La radiazione solare diretta DNI è misurata da un pireliometro, installato su un inseguitore solare ad elevata precisione.

4.3 Apparato di misura

L'apparato di misura mostrato in Figura 27 è composto dall'HFM e un sistema di movimentazione semiautomatico che permette allo strumento di muoversi nel piano di misura. Questo piano coincide con il piano ottimale di concentrazione che è inclinato di 45° rispetto al piano normale all'area di apertura. L'inclinazione serve a minimizzare l'angolo medio d'incidenza dei raggi solari sulla regione di concentrazione. Il sistema di movimentazione è composto da un carrello in grado di traslare parallelamente alla linea focale (asse x) mentre l'altro, grazie ad un attuatore elettrico, muove il sensore sul piano di misura (asse z). La lunghezza totale dell'asse x è pari a metà della lunghezza focale e la misurazione viene effettuata a intervalli di 12 cm ottenendo 10 posizioni di misura. L'asse z misura la radiazione su una fascia di 13 cm sul piano di misura dove la linea teorica del fuoco si trova a 6.5 cm dal punto iniziale di misura. La velocità di movimentazione dell'asse z fatta dall'attuatore è costante a meno delle rampe di accelerazione e decelerazione ed è fissata a 0.5 cm/s in salita e 5cm/s in discesa. Data la velocità di campionamento del sistema di acquisizione e dello strumento, possiamo calcolare il numero di punti presi in una singola posizione di misura ottenendo un valore di 130 punti. Questo ci permette un'ottima risoluzione spaziale. Il numero di punti è relativo alla sola salita dello strumento mentre i punti in discesa non verranno considerati.

Dopo aver completato una lettura lo strumento viene posizionato in una nuova coordinata x e si ripete l'intero processo che viene compiuto in un totale di circa 5 minuti. In parallelo il pireliometro misura la componente diretta della radiazione e ci permette di scegliere se le misure effettuate possono essere considerate. La scelta è fatta sulla differenza tra la misura massima e minima della DNI presa nel tempo di misura totale. Se questo valore è entro il valore d'incertezza del pireliometro nell'arco delle misure allora la misura è presa come buona.

Come esposto in precedenza, lo strumento è sensibile al valore della temperatura superficiale ma, nel nostro sistema, lo stesso è raffreddato da un corpo in rame all'interno del quale scorre dell'acqua. Con il circuito di raffreddamento è possibile avere una temperatura media dello strumento prossima alla temperatura ambiente. In particolare il valore in una prima prova era stabile in un intorno di 21°C. Come è possibile verificare con le equazioni precedenti questo valore influisce sulla misura di flusso ma, una piccola variazione della temperatura, non incide in maniera significativa sul flusso. Per esempio una variazione di 5°C della superficie comporta una variazione dello 0.6% nella lettura del flusso. Per questo motivo, nelle misurazioni successive, questo valore non è stato acquisito ottenendo inoltre il vantaggio di un campionamento più rapido per come è costruito il datalogger. La portata presa per il sistema di raffreddamento è di 60 Kg/h e l'acqua viene raffreddata in uno scambiatore secondario che scambia calore con acqua di pozzo a 18°C.

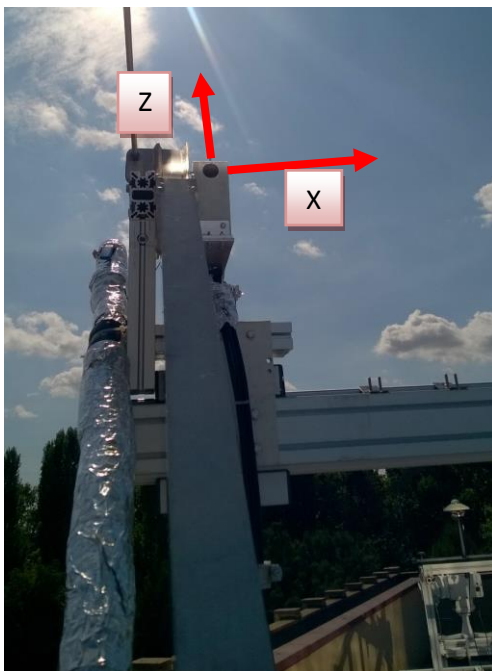


Figura 27 Sistema di misura

Per ottenere delle misure quanto più accurate possibili, prima dei test, gli specchi sono stati opportunamente puliti insieme al pireliometro e al sensore di posizionamento del concentratore.

5 METODOLOGIA DI RIDUZIONE DEI DATI SPERIMENTALI

Dalle prove effettuate si ottengono quattro valori di interesse per il calcolo delle prestazioni ottiche del concentratore. I valori sono raccolti dal datalogger al quale sono collegati lo strumento, il pireliometro e il sensore di posizione dell'asse z. Il risultato finale è una tabella simile a quella rappresentata sotto.

Tabella 1 Esempio della matrice dei valori misurati.

Numero misura data e ora	Posizione	Flusso	DNI	Tsup
-----------------------------	-----------	--------	-----	------

Prima di esporre il metodo di risoluzione è doverosa una precisazione riguardo al datalogger. Il sistema di campionamento infatti è di tipo analogico e segue la lettura di un canale alla volta, ma poiché lo strumento è in movimento otteniamo delle letture di flusso che non corrispondono esattamente al valore di posizione. In totale il datalogger impiega in media 200 ms per leggere posizione, flusso e DNI (ricordiamo che la temperatura superficiale non viene acquisita). Siccome il canale di lettura del flusso è immediatamente successivo al canale della posizione, l'intervallo temporale tra le due letture moltiplicato per la velocità di spostamento danno misure di flusso che corrispondono a una posizione sbagliata di 0.3 mm. Questa problematica non è stata considerata perché di entità trascurabile rispetto ad un eventuale errore di posizionamento dello strumento nella fase precedente alla misura.

I dati ottenuti devono essere interpolati da un programma in Matlab che fornisce come primo output una matrice di interpolazione dei valori di flusso misurato. L'ambiente Matlab offre svariati interpolatori che permettono di scegliere la risoluzione della griglia interpolatrice e il metodo d'interpolazione. Nel caso in esame si sono testati: metodo lineare, metodo cubico e un metodo spline biarmonico. I risultati ottenuti da questi metodi evidenziano che la potenza incidente non varia in funzione del metodo mentre la rappresentazione grafica della distribuzione di flusso risulta esserne influenzata. Per questo motivo le immagini seguenti sono ottenute con metodo biarmonico perché offre la rappresentazione migliore. Il calcolo della potenza incidente è invece influenzato dalla dimensione della griglia d'interpolazione. In questo caso si sono fatte alcune prove utilizzando l'integratore quad2d di matlab che permette di ottenere il valore di flusso data una matrice di dati. Il valore è stato confrontato con quello ottenuto con il metodo proposto da Ballestrin et al.[7]. Il processo consiste in una sommatoria dei valori di flusso contenuti nella matrice d'interpolazione pesata per il numero di punti presi secondo la seguente formula:

$$P_i = \frac{A_{rc}}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (5.1)$$

Si evidenzia che i due valori di potenza arrivano ad essere vicini con una risoluzione della griglia di interpolazione di 0.1 mm lungo l'asse x e 0.1 mm lungo l'asse z. Una volta ottenuto il valore di potenza si procede al calcolo del fattore di intercettazione γ ad essa riferito secondo la seguente formula:

$$\gamma = \frac{P_t}{DNI A_{sp} \rho} = \frac{1}{DNI A_{sp} \rho} \frac{A_{rc}}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (5.2)$$

Osserviamo che nei concentratori solari con rapporto di concentrazione maggiore di 10 si può considerare solo la componente diretta della radiazione incidente sul ricevitore [17]. Possiamo quindi escludere l'influenza della componente diffusa nei nostri risultati. Infine la mesh è stata scelta in maniera tale da ottenere risultati molto simili tra l'integratore di Matlab e il metodo proposto nell'articolo.

5.1 Incertezza di misura

Le misure affette da incertezza sono: DNI, Posizione lungo l'asse x, lungo l'asse z, dimensioni degli specchi e incertezza del modello. L'incertezza dello strumento è fissata nel 3% della misura mentre le incertezze dalle dimensioni degli specchi sono di 1 mm per ogni lato. Per ottenere l'incertezza dell'area ricevente queste devono essere combinate secondo la seguente formula:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{df}{dx_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (5.1.1)$$

Per quanto riguarda le posizioni lungo l'asse x, queste sono fissate da delle cerniere che bloccano lo strumento nella posizione desiderata e dalle quali si è stimato un valore d'incertezza di 1mm nel posizionamento. L'incertezza sull'asse z è invece rappresentata dall'accuratezza dell'attuatore nel posizionarsi con un valore dichiarato di 0.1mm. Le due grandezze vanno composte con la stessa formula usata per l'area. L'incertezza sulla misura della DNI è il 3% del valore misurato.

L'incertezza relativa alla potenza incidente, data dal metodo d'integrazione, viene valutata dalla formula presente nel lavoro di Ballestrin et al [7] ed è riportata di seguito.

$$u_{\text{int}}(P_t) = \frac{A_{rc}}{n} \sum_{i=1}^n u(q_i) + \frac{u(A_{rc})}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (5.1.2)$$

Per quanto riguarda l'incertezza del metodo d'interpolazione è stata fatta un'analisi di sensibilità dei risultati al variare dell'interpolatore e si è osservato che questa incertezza può essere trascurata.

6 RISULTATI SPERIMENTALI

Tutti i dati elaborati dal programma fanno riferimento a misurazioni effettuate il 28 settembre 2015, con cielo sereno. In totale sono state ritenute valide 7 campagne di misura effettuate lo stesso giorno e a pochi minuti di distanza tra loro. La radiazione incidente rilevata dal pireliometro durante i test era in media di 890 W/m^2 . Non è stata misurata la velocità del vento mentre la temperatura ambiente era di circa 24°C .

Come detto in precedenza la velocità dello strumento di 0.5cm/s e una velocità di campionamento di circa 0.2 s hanno permesso di raccogliere ben 130 misure per ogni corsa dell'asse z, spazzando un'area di 1080 mm lungo l'asse x e 130 mm lungo l'asse z. Si sono ottenuti i seguenti risultati:

6.1 Distribuzione della densità di flusso sul ricevitore.

Questo grafico rappresenta l'andamento del flusso concentrato nell'area di misura considerata. I valori evidenziati con punti blu rappresentano il valore di flusso solare concentrato misurato, mentre la superficie colorata rappresenta tutti i valori d'interpolazione ottenuti con il metodo biarmonico. Dalla figura si osserva subito una forte variazione del valore di flusso lungo l'asse z che cresce verso il centro dell'area di misura dove è posizionata la linea focale ideale del concentratore. Per quanto riguarda l'asse x, si osserva una disuniformità del flusso che evidenzia da subito una non perfetta e ideale concentrazione dei raggi solari.

Per fornire un'immagine più chiara, la superficie d'interpolazione di Figura 28 presenta una mesh molto più ampia rispetto a quella usata per il calcolo di tutti i valori caratteristici del concentratore.

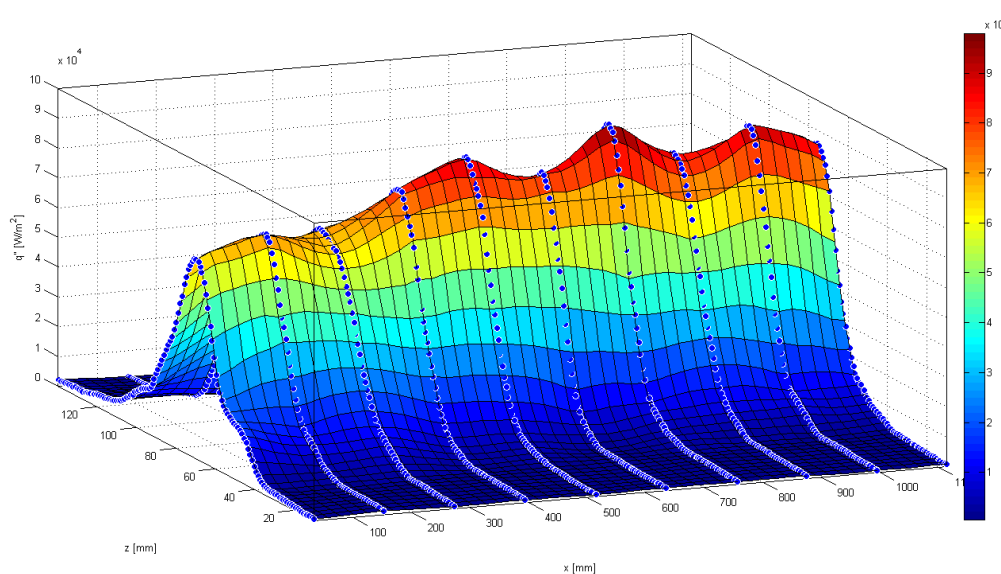


Figura 28 Distribuzione della densità di flusso solare concentrato

Un'altra rappresentazione interessante del flusso solare concentrato si ottiene tramite un grafico contenente linee isoflusso. Questo ci permette di capire meglio la distribuzione del flusso nel piano di misura e, come ci si aspettava, si osserva un addensamento delle linee nella parte centrale del ricevitore. Il motivo è che il fuoco teorico del concentratore solare parabolico è posizionato a 75 mm dell'asse z. Come conseguenza della distribuzione delle isoflusso possiamo dire che la maggior parte della radiazione solare concentrata è presente in un intorno di ± 30 mm rispetto al fuoco teorico.

In Figura 29 si osserva che l'ampiezza totale della zona di concentrazione è di circa 100 mm. Per questo motivo successivamente si prenderà in considerazione solo una fascia massima di 100 mm nella quale il fuoco teorico è centrato.

Per chiarezza si osserva che è stato preso un valore arbitrario pari a 20 isoflusso, necessario ad avere una rappresentazione sufficientemente chiara.

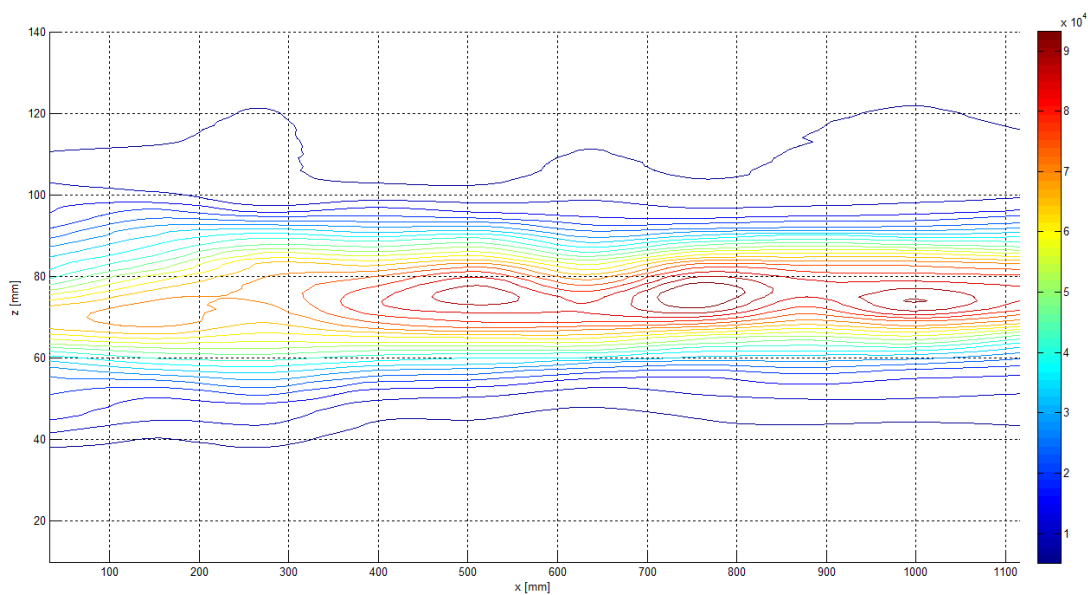


Figura 29 Isotherme del flusso solare concentrato

Un'altra analisi che è possibile fare con questi dati è ottenere un valore di W/m per ogni punto di misura e un W/m medio. Il parametro può essere interessante perché permette di stimare la producibilità di un sistema simile ma con n-metri di lunghezza del ricevitore.

La media dei valori ottenuti ci fornisce una potenza di 2566 W/m, inferiore alla potenza media incidente sugli specchi.

I valori puntuali di potenza per metro di ricevitore possono inoltre essere messi in relazione alla potenza incidente riferita all'altezza dello specchio. Possiamo osservare nella Figura 31 che questo valore in alcuni punti eccede l'unità. Questa causa è da imputare a una non perfetta disposizione degli specchi oltre a una certa incertezza nella misurazione dei flussi.

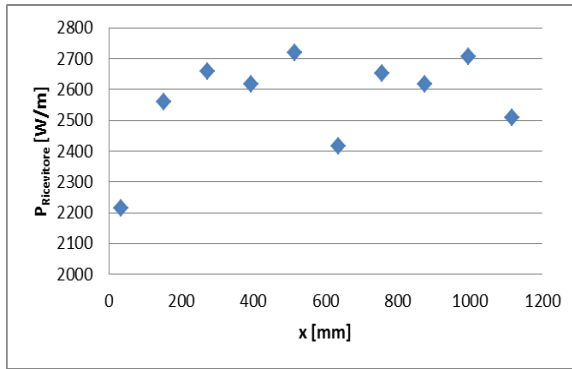


Figura 30 Potenza incidente sul ricevitore per metro di lunghezza

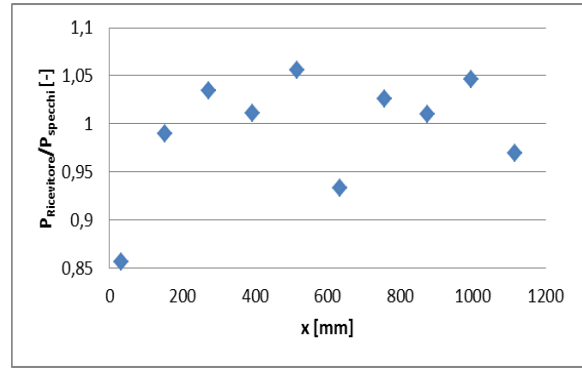


Figura 31 Rapporto tra potenza misurata sul ricevitore e potenza incidente sugli specchi

Per alcuni campionamenti, vengono infine rappresentati i profili sperimentali di distribuzione media del flusso concentrato lungo l'altezza della regione di concentrazione ottenuta come media lungo l'asse z dei valori misurati. Gli andamenti per tre test vengono rappresentati nella

Figura 32 dove si osserva che le curve non sono sovrapposte tra loro. Lo scostamento è tuttavia minimo e trascurabile.

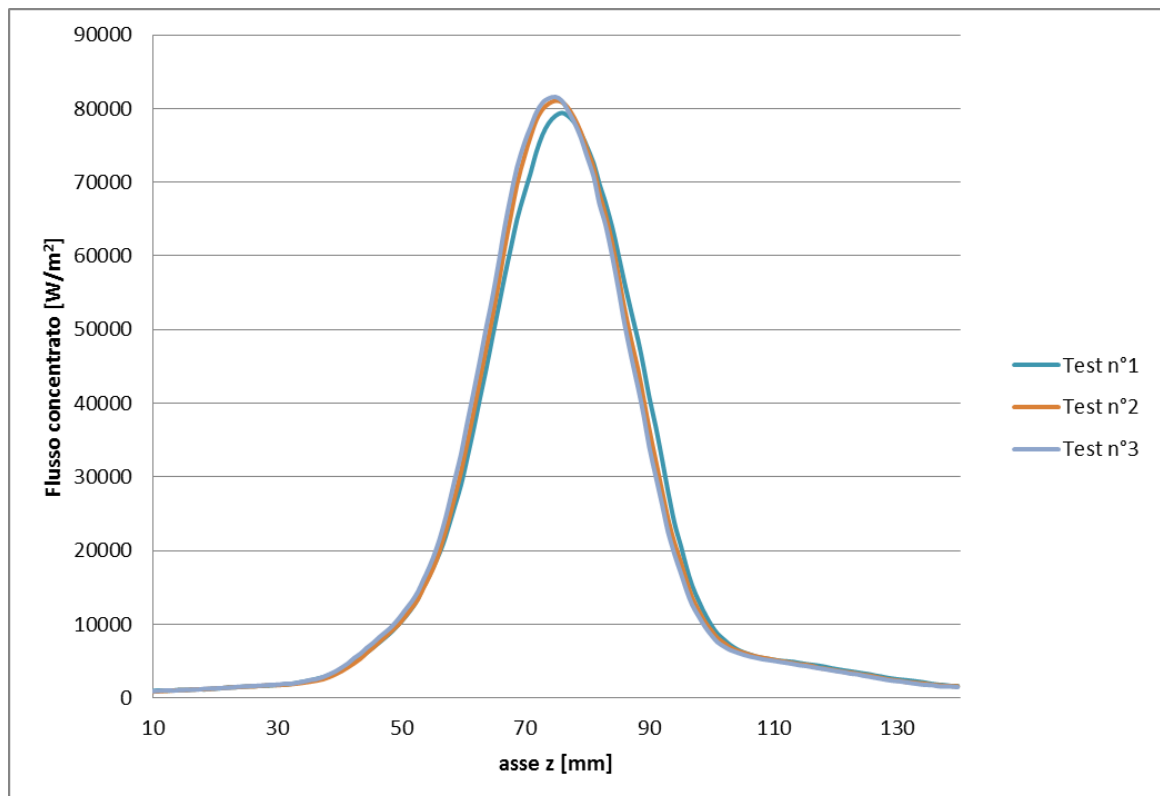


Figura 32 Rappresentazione degli andamenti medi di flusso solare concentrato

6.2 Fattore d' intercettazione

Dall'elaborazione dei dati otteniamo i seguenti valori del fattore d'intercettazione ottenuti con metodo cubico di interpolazione.

Tabella 2 Risultati ottenuti dalle prove sperimentali sul collettore solare a concentrazione

Dati della misure del 28-09-2015 ora 13:58						
	Ampiezza del ricevitore presa [mm]					
	100	90	80	70	60	50
Potenza incidente sugli specchi [W]	2870,4	2870,4	2870,4	2870,4	2870,4	2870,4
Potenza incidente sullo strumento [W]	2835,5	2808,8	2773,7	2724,8	2654,7	2553,9
Fattore d'intercettazione [-]	1,0279	1,0183	1,0055	0,9878	0,9624	0,9259
Incertezza sulla potenza incidente sugli specchi [%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Incertezza sulla potenza incidente sullo strumento [%]	3,14%	3,14%	3,16%	3,17%	3,19%	3,22%
Incertezza sul fattore d'intercettazione [%]	4,46%	4,43%	4,38%	4,31%	4,22%	4,08%
Dati della misure del 28-09-2015 ora 14:04						
	Ampiezza del ricevitore presa [mm]					
	100	90	80	70	60	50
Potenza incidente sugli specchi [W]	2865,6	2865,6	2865,6	2865,6	2865,6	2865,6
Potenza incidente sullo strumento [W]	2802,9	2775,6	2742,3	2698,6	2635,8	2545
Fattore d'intercettazione [-]	1,0178	1,0079	0,9958	0,9800	0,9572	0,9242
Incertezza sulla potenza incidente sugli specchi [%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Incertezza sulla potenza incidente sullo strumento [%]	3,14%	3,14%	3,16%	3,17%	3,19%	3,22%
Incertezza sul fattore d'intercettazione [%]	4,42%	4,38%	4,34%	4,28%	4,19%	4,07%
Dati della misure del 28-09-2015 ora 14:11						
	Ampiezza del ricevitore presa [mm]					
	100	90	80	70	60	50
Potenza incidente sugli specchi [W]	2860,13	2860,13	2860,13	2860,13	2860,13	2860,13
Potenza incidente sullo strumento [W]	2827,9	2799,7	2764,5	2719,3	2657,2	2564,4

Fattore d'intercettazione [-]	1,0289	1,0186	1,0058	0,9894	0,9667	0,9330
Incertezza sulla potenza incidente sugli specchi [%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Incertezza sulla potenza incidente sullo strumento [%]	3,14%	3,14%	3,16%	3,17%	3,19%	3,22%
Incertezza sul fattore d'intercettazione [%]	4,47%	4,43%	4,38%	4,32%	4,23%	4,11%
Dati della misure del 28-09-2015 ora 14:31						
	Ampiezza del ricevitore presa [mm]					
	100	90	80	70	60	50
Potenza incidente sugli specchi [W]	2793,23	2793,23	2793,23	2793,23	2793,23	2793,23
Potenza incidente sullo strumento [W]	2738,5	2711,7	2679	2637,8	2580,9	2498
Fattore d'intercettazione [-]	1,0202	1,00102	0,9980	0,9827	0,9615	0,9306
Incertezza sulla potenza incidente sugli specchi [%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Incertezza sulla potenza incidente sullo strumento [%]	3,14%	3,14%	3,16%	3,17%	3,19%	3,22%
Incertezza sul fattore d'intercettazione [%]	4,43%	4,39%	4,35%	4,29%	4,21%	4,10%
Dati della misure del 28-09-2015 ora 14:37						
	Ampiezza del ricevitore presa [mm]					
	100	90	80	70	60	50
Potenza incidente sugli specchi [W]	2783,22	2783,22	2783,22	2783,22	2783,22	2783,22
Potenza incidente sullo strumento [W]	2732,6	2704,1	2669,9	2627,8	2571,7	2487,3
Fattore d'intercettazione [-]	1,0217	1,0110	0,9982	0,9825	0,9615	0,9299
Incertezza sulla potenza incidente sugli specchi [%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Incertezza sulla potenza incidente sullo strumento [%]	3,14%	3,14%	3,16%	3,17%	3,19%	3,22%
Incertezza sul fattore d'intercettazione [%]	4,4%	4,39%	4,35%	4,29%	4,21%	4,09%
Dati della misure del 28-09-2015 ora 14:43						
	Ampiezza del ricevitore presa [mm]					
	100	90	80	70	60	50
Potenza incidente sugli specchi [W]	2783,01	2783,01	2783,01	2783,01	2783,01	2783,01

Potenza incidente sullo strumento [W]	2726,5	2699,1	2666,6	2626,1	2570,8	2488,4
Fattore d'intercettazione [-]	1,0195	1,0092	0,9970	0,9819	0,9613	0,9304
Incertezza sulla potenza incidente sugli specchi [%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Incertezza sulla potenza incidente sullo strumento [%]	3,14%	3,14%	3,16%	3,17%	3,19%	3,22%
Incertezza sul fattore d'intercettazione [%]	4,43%	4,39%	4,34%	4,29%	4,21%	4,10%
Dati della misure del 28-09-2015 ore 14:49						
	Ampiezza del ricevitore presa [mm]					
	100	90	80	70	60	50
Potenza incidente sugli specchi [W]	2796,14	2796,14	2796,14	2796,14	2796,14	2796,14
Potenza incidente sullo strumento [W]	2753,4	2726,2	2693,4	2652	2594,8	2511,9
Fattore d'intercettazione [-]	1,0247	1,0145	1,0023	0,9870	0,9657	0,9348
Incertezza sulla potenza incidente sugli specchi [%]	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Incertezza sulla potenza incidente sullo strumento [%]	3,14%	3,14%	3,16%	3,17%	3,19%	3,22%
Incertezza sul fattore d'intercettazione [%]	4,45%	4,41%	4,37%	4,31%	4,23%	4,12%

I risultati mostrano una buona ripetibilità nell'arco dei vari test effettuati. Il fattore d'intercettazione nelle ampiezze considerate è sempre maggiore del 92% e questo dimostra che il sistema di concentrazione è stato progettato bene. Infine per le ampiezze maggiori si osservano fattori d'intercettazione maggiori all'unità ma, questo non è possibile per la definizione stessa di fattore d'intercettazione. In questi casi la causa è da attribuirsi ad errori che influenzano le misure usate per il calcolo dello stesso. In ogni caso l'incertezza è tale da far rientrare il coefficiente nei limiti di accettabilità.

7 MODELLO OTTICO

Uno degli obiettivi dell'attività sperimentale è anche quello di sviluppare un modello ottico del concentratore che si dimostri affidabile per eseguire simulazioni sulle prestazioni in condizioni operative diverse da quelle dei test. Per questo motivo è stato sviluppato un modello ottico del collettore in SOLTRACE. Questo software del *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* permette di creare un modello ottico del ricevitore e di risolverlo con metodo Monte Carlo. I parametri implementati nel modello sono:

- Geometria del collettore
- Proprietà ottiche
- Sunshape
- Errore ottico globale

La geometria del collettore implementata è composta da una semi parabola che identifica l'area degli specchi e da una piastra piana posta sul fuoco che rappresenta il piano ideale di concentrazione. Per ottenere dei risultati corretti è stata implementato un piano ulteriore che scherma il piano di concentrazione dalla radiazione solare incidente non riflessa dagli specchi. Ad ognuna di queste superfici sono state assegnate delle caratteristiche ottiche. In particolare il ricevitore è caratterizzato da un coefficiente d'assorbimento unitario e gli specchi da un coefficiente di riflessione unitario, solo per il calcolo del fattore d'intercettazione. Invece per ottenere i vari profili di flusso mostrati in seguito il coefficiente di riflessione è stato preso pari a 0.96. Tenendo conto che i test sono stati condotti in una giornata caratterizzata da cielo sereno; è stata presa una curva CR0 dove la componente circumpolare è poco importante nella definizione del profilo di densità solare. L'errore ottico globale è definito dal programma come una combinazione dell'errore di forma e dall'errore relativo alla rugosità della superficie. In tutte le prove la rugosità è rimasta costante e prossima allo zero, mentre l'errore di forma è stato variato. Questo errore di forma unisce in realtà tutti gli errori (forma, riflessione, inseguimento, posizionamento), che sono stati applicati alla superficie riflettente dal momento che, come l'errore di forma, sono tutti modellati con una distribuzione gaussiana.

Uno dei principali risultati che si ottiene dal programma è la distribuzione di flusso solare incidente come mostrato nella figura sotto. Possiamo subito notare come il flusso sia uniforme lungo tutto l'asse y del ricevitore mentre l'asse x sia caratterizzato da un addensamento del flusso in prossimità della linea di fuoco. Questi valori di flusso sono riferiti a un flusso incidente di 1000 W/m² mentre gli assi x e y corrispondono agli assi z e x del piano di misura descritto precedentemente.

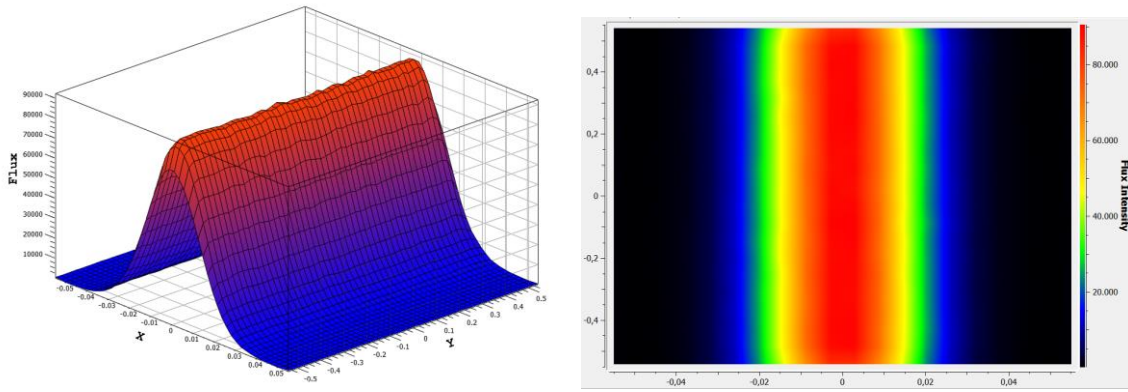


Figura 33 Distribuzione di densità di flusso sul ricevitore ottenuta con SOLTRACE considerando una potenza incidente di 1000 W/m^2 . A destra sono rappresentate le isoflussi

Variando l'errore ottico globale è possibile ottenere più distribuzioni di flusso. Per ognuna di queste è possibile ricavare un andamento medio del flusso lungo l'asse z ottenendo vari andamenti. L'immagine sotto esprime graficamente quanto appena descritto.

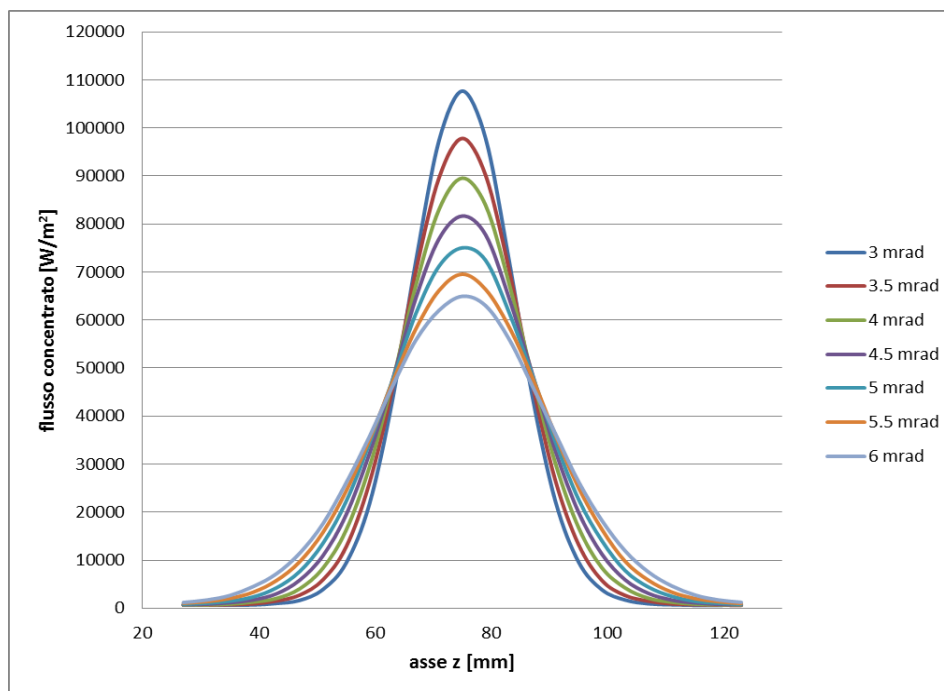
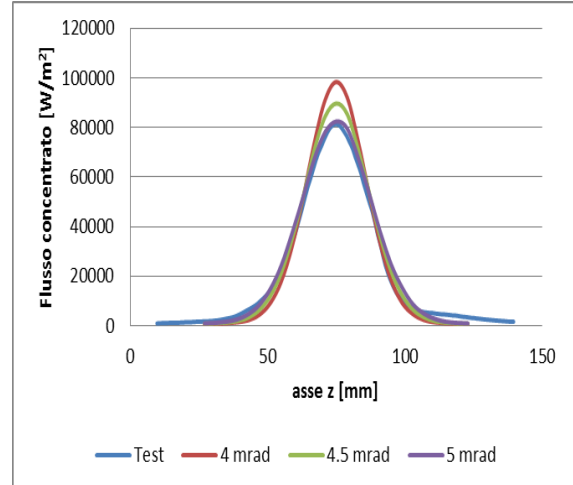
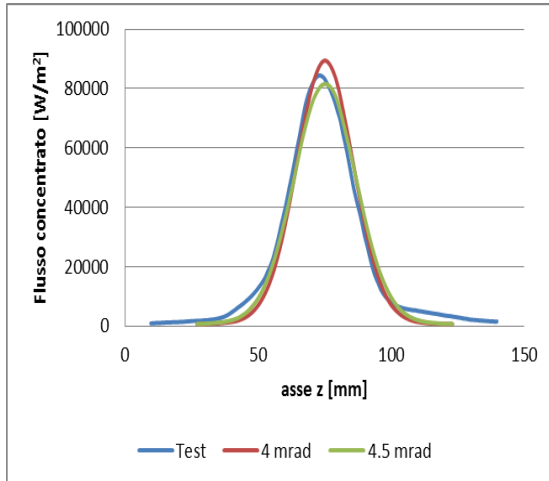


Figura 34 Andamenti del flusso solare concentrato lungo l'altezza z del ricevitore al variare dell'errore ottico globale

Nelle figure sotto è possibile vedere la relazione tra le curve ottenute dai dati sperimentali e le curve ottenute con SOLTRACE. Si osserva che le curve dei dati sono in buon accordo con quelle del modello ottico per valori dell'errore ottico globale che varia tra i 4 e i 5 mrad. Possiamo quindi identificare l'errore ottico globale tipico del concentratore con il valore di 4.5 mrad.



Si riportano infine i valori del fattore d'intercettazione ottenuti con il modello. SOLTRACE permette di identificare anche la potenza incidente sulle varie porzioni di ricevitore e, quindi, di fare una stima del fattore d'intercettazione facendo un semplice rapporto tra quello che arriva al ricevitore e quello riflesso dagli specchi.

Tabella 3 Fattori d'intercettazione ottenuti con SOLTRACE ottenuti al variare dell'ampiezza del ricevitore e dell'errore ottico globale

Errore ottico globale	Ampiezza del ricevitore [mm]					
	100	90	80	70	60	50
4 mrad	99.36%	99.36%	99.35%	99.1%	98.55%	96.84%
4.5 mrad	99.23%	99.2%	99.1%	98.77%	97.81%	95.08%
5 mrad	99.14%	99.09%	98.88%	98.28%	96.78%	93.37%

Osservando i risultati precedenti si nota che γ sperimentale è compreso tra le curve a $\sigma=4.5$ mrad e $\sigma=5$ mrad. Questo conferma le osservazioni fatte con i profili medi di distribuzione e permette di concludere che il modello in SOLTRACE, con un errore ottico globale di 4.5 mrad, può essere affidabile e preso per la stima delle prestazioni o la progettazione del ricevitore. Si osserva che i valori del fattore d'intercettazione ottenuti con SOLTRACE sono compresi tra il 93% e il 99.3% per il modello e gli errori ottici presi. Questo verifica che per 100 mm si misura tutto il flusso solare concentrato poiché il fattore d'intercettazione tende all'unità per tutti gli errori ottici globali. Si riporta sotto il grafico del fattore d'intercettazione misurato sperimentalmente e ottenuto in SOLTRACE in funzione dell'ampiezza del ricevitore.

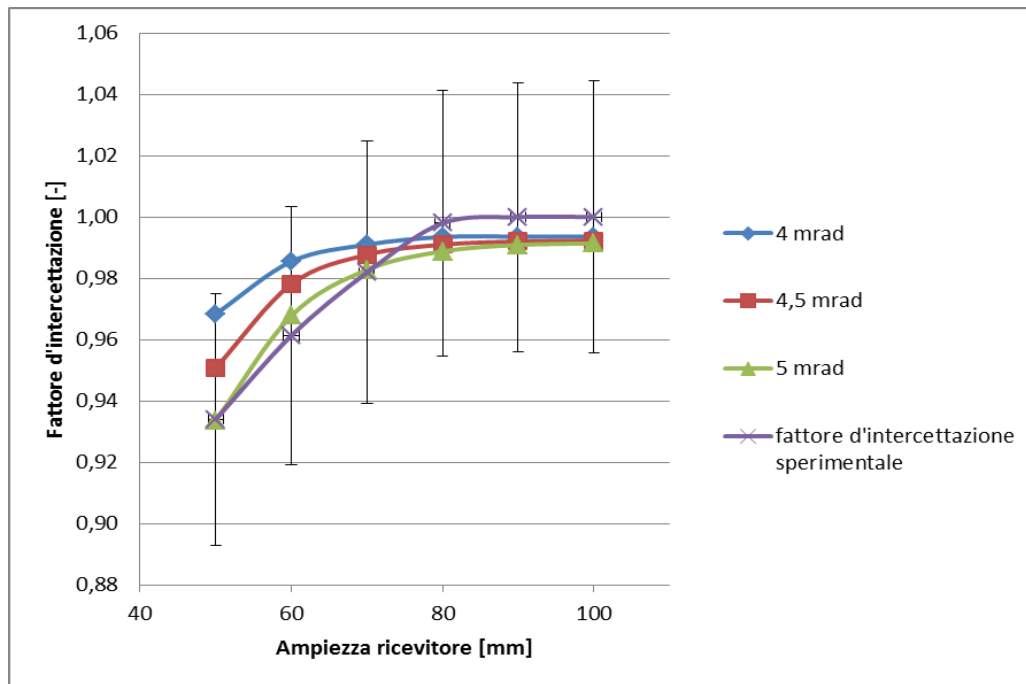


Figura 35 Fattore d'intercettazione sperimentale e ottenuto con SOLTRACE in funzione dell'ampiezza del ricevitore.

8 MODELLO TERMICO DEL COLLETTORE

8.1 Modello fisico

Il modello sviluppato in questo capitolo per il collettore viene validato attraverso dei dati raccolti durante un precedente lavoro sperimentale. Durante questo studio sperimentale sono state svolte delle prove su un ricevitore piano utilizzando il concentratore solare descritto precedentemente. L'oggetto del lavoro è stato quello di caratterizzare le prestazioni termiche del ricevitore facendovi scorrere all'interno un fluido in monofase e un fluido in cambiamento di fase; ottenendo l'andamento della curva di efficienza del ricevitore nelle due condizioni di deflusso.

Il seguente lavoro parte dai dati raccolti dal precedente lavoro di tesi e propone un modello termico semplificato del ricevitore in esame per il solo deflusso in monofase. Questo modello vuole essere un ausilio alla prima progettazione del ricevitore e una base per modelli successivi.



Figura 36 Particolare sotto irraggiamento del ricevitore utilizzato

Il sistema precedente con il quale si è sviluppato il modello esposto montava un ricevitore piano lungo 1.2 m e alto 68 mm senza alcuna copertura vetrata. Con questo ricevitore, il rapporto di concentrazione è di 42. Il ricevitore consiste in un canale in alluminio il quale presenta un turbolatore all'interno e un isolamento posteriore di 20 mm di lana di roccia mentre le pareti laterali non presentano alcun isolamento. La superficie frontale del ricevitore ha un assorbimento solare della radiazione attorno al 90% e un'emissività a 100°C del 44%.

Analisi del ricevitore

Dai dati precedentemente raccolti possiamo osservare che le differenze di temperatura tra ingresso e uscita sono modeste (circa $7/8^{\circ}\text{C}$) e questo è dovuto al fatto che il ricevitore ha una lunghezza ridotta e una portata di fluido elevata (250 kg/h). L'altra considerazione da fare è che le perdite termiche sono molto variabili anche durante la stessa giornata di misura, portando a pensare che l'azione del vento possa aver contribuito a questa differenza. È possibile osservare questo guardando la variazione dei valori di rendimento termico a parità di temperatura media ridotta. Purtroppo la velocità del vento non è stata misurata durante le precedenti misurazioni pertanto nella creazione del modello sono state prese in considerazione sia equazioni per la convezione forzata che per quella naturale.

In base a queste considerazioni si è scelto di fare un modello semplificato che riceve come dato in input la temperatura media del fluido per stimare gli scambi termici. Anche con questa semplificazione il ricevitore è caratterizzato da una struttura composta da due materiali con caratteristiche termiche differenti che portano a gradienti e resistenze molto variabili all'interno della sezione considerata. A complicare il modello c'è il fatto che la radiazione solare incide solo su una faccia con distribuzione non uniforme, e che la parte interna, dove scorre il fluido, è caratterizzata da un turbolatore che ne complica la geometria interna.

Per valutare come trattare il problema in modo semplificato, ma attinente al fenomeno considerato, è stata fatta un'analisi semplificata agli elementi finiti della sezione tipo. Il programma scelto per l'analisi è Mirage, un software gratuito agli elementi finiti, che permette una modellazione bidimensionale di una sezione del ricevitore. Una problematica derivante da questo programma è la possibilità di implementare una sola condizione al contorno per le perdite convettive e radiative dando ulteriori problemi nella superficie ricevente dove è presente anche un flusso incidente.

Questi problemi sono stati risolti considerando per tutte le superfici esterne uno scambio convettivo con dei coefficienti di scambio termico che tengono conto di radiazione e convezione. Il flusso incidente invece è stato modellato come una generazione in un volume infinitesimo sulla parte incidente, mentre per quanto riguarda la distribuzione di flusso termico è stato preso un valore costante lungo tutta la larghezza del ricevitore. Per la parte relativa allo scambio termico interno del fluido non è stata considerata la geometria del turbolatore semplificando di molto la trattazione. Tutti questi coefficienti di scambio termico sono stati stimati con le formule esposte di seguito.

L'analisi è infine stata fatta per due temperature medie del fluido interno pari a 50°C e 120°C mostrando risultati simili.

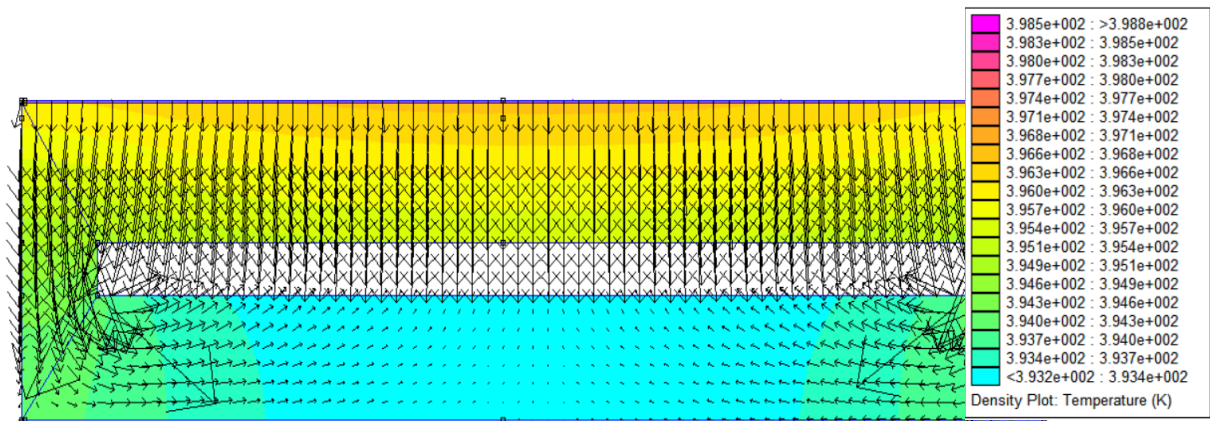


Figura 37 Sezione del ricevitore (solo parte in alluminio) analizzato con Mirage. È possibile osservare gli andamenti della temperatura e del flusso termico.

La Figura 37 mostra i risultati dell'analisi per la sola parte in alluminio. Lo strato isolante non è rappresentato graficamente ma viene considerato nel modello caratterizzando la superficie posteriore con un flusso termico uscente pari a quello stimato per lo strato isolante. In questo modo riusciamo ad avere una rappresentazione più chiara delle differenze di temperatura all'interno della parte in alluminio del ricevitore. Le frecce nere rappresentano i valori di flusso incidente ed è possibile osservare che la distribuzione di densità di flusso è costante lungo la larghezza del ricevitore. Questo lo si può notare perché, nella parte superiore, il flusso è rappresentato da vettori paralleli tra loro e uguali in modulo e direzione.

L'altro aspetto da evidenziare è l'influenza che i bordi esterni hanno sulla conduzione del fluido anche sulla parte posteriore del ricevitore. Nelle prove fatte i vettori di flusso tendono a tornare verso il ricevitore interno perché la temperatura media sulla superficie interna del ricevitore è sempre maggiore della temperatura del fluido. Questo fatto sarebbe accentuato se si fosse implementata la struttura del turbolatore perché ci sarebbero stati maggiori contatti metallici tra le due superfici interne che conducono molto bene il calore. La prima assunzione quindi ha portato a considerare una temperatura media del perimetro interno costante e sempre maggiore di quella del fluido. Analizzando ora l'andamento delle temperature esterne si vede che la struttura metallica del ricevitore è caratterizzata da una conduzione elevata e tende ad uniformare le temperature superficiali esterne. Il gradiente di temperatura tra le stesse è modesto e questo ha portato a semplificare il modello considerando una temperatura superficiale delle pareti esterne uniforme. Il modello finale proposto è zero dimensionale perché la superficie esterna, la superficie interna e il fluido sono rappresentati da un nodo ciascuno. Lo schema di resistenze, rappresentato qui sotto, considera il bilancio termico sulla superficie esterna del ricevitore. In questo bilancio sono presenti tutte le equazioni che caratterizzano lo scambio termico verso l'esterno e il flusso termico incidente sulla piastra. Da questa superficie un flusso termico va verso la superficie interna dalla quale il fluido assorbe calore per convezione.

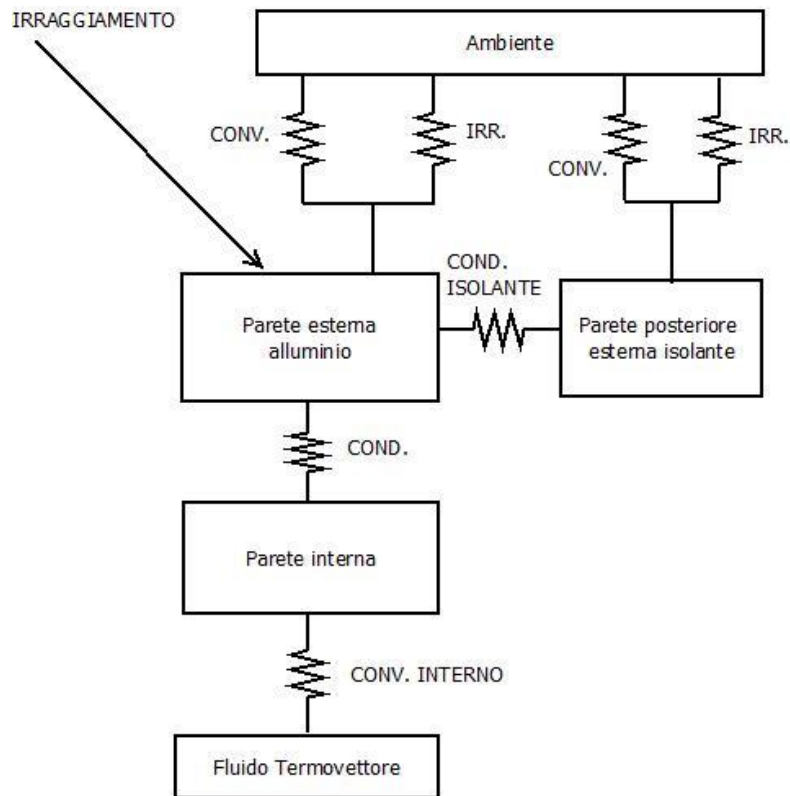


Figura 38 Modello di resistenze che esprime il modello termico del ricevitore piano scoperto

Il modello di resistenze termiche nel caso di copertura vetrata considera invece degli scambi termici aggiuntivi e viene rappresentato dal seguente schema di resistenze.

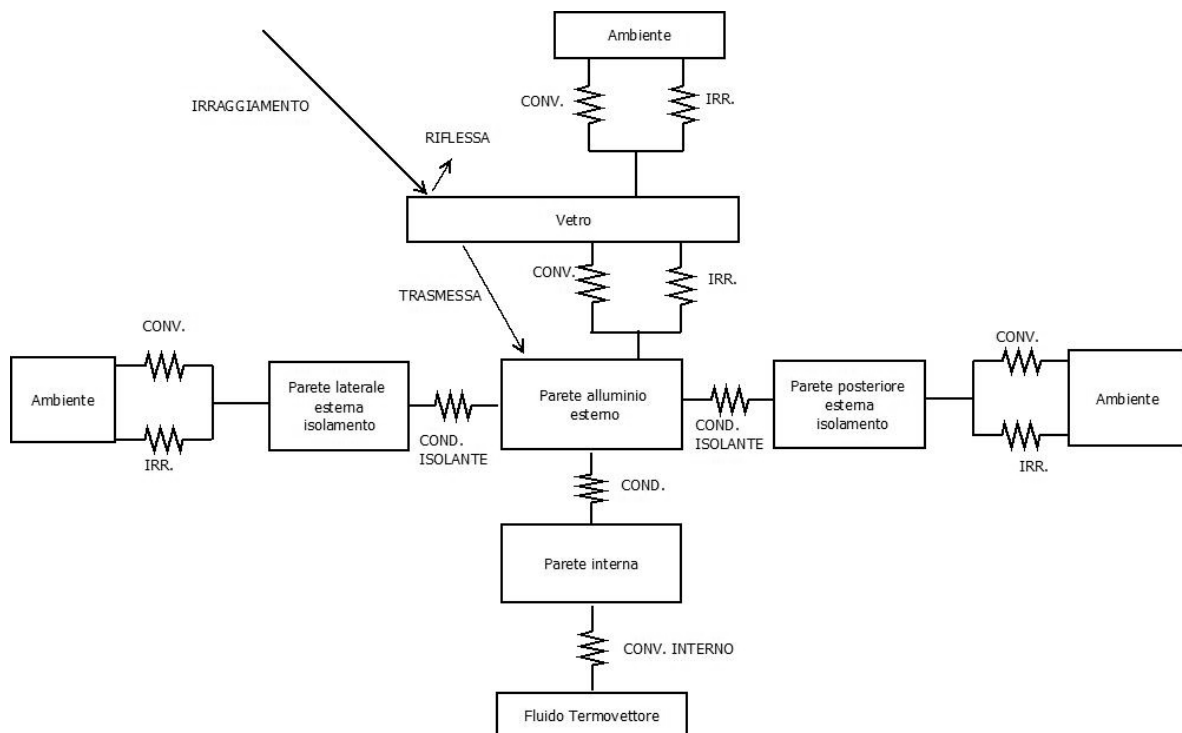


Figura 39 Modello di resistenze termiche scelto per il ricevitore piano coperto

Si ripostano di seguito le varie equazioni che caratterizzano i modelli di resistenze termiche esposti.

1) Flusso incidente

Il flusso incidente è pari alla componente diretta della radiazione incidente sugli specchi moltiplicato per il rendimento ottico del concentratore e l'area degli specchi secondo la seguente formula:

$$q_{inc} = DNI \cdot \eta_{opt} \cdot A_{sp} \quad (8.1)$$

Il rendimento ottico è stato stimato nel lavoro precedente osservando il valore della curva di efficienza alla temperatura media ridotta nulla. Questo valore è stato pertanto preso pari a 0.82. Da questo valore secondo la formula (1.3) è possibile identificare il coefficiente di assorbimento α della superficie. Questo perché il fattore d'intercettazione è noto dalle misure effettuate e la riflessività degli specchi è data dal costruttore. Il valore ottenuto è un coefficiente di assorbimento α di 0.86.

In caso di copertura trasparente bisogna aggiungere un coefficiente moltiplicativo che tenga conto della parte di radiazione incidente che non viene lasciata passare dal vetro. Questo coefficiente di trasmissione (τ) è successivamente considerato pari a 0.95.

2) Scambio termico lato esterno

Lo scambio termico lato esterno varia in funzione della modalità di scambio termico. In particolare per questo modello si studia sia la convezione naturale che la convezione forzata.

Convezione naturale

Per la convezione naturale sono state scelte delle equazioni che considerano l'orientazione delle superfici. Il problema è che, per come è posizionato il ricevitore e per il fatto che si muove nel tempo, le superfici del ricevitore variano la loro orientazione pertanto i calcoli fanno riferimento a un caso ideale. In particolare, la superficie ricevente e quella posteriore sono state prese verticali mentre i lati sono stati presi orizzontali. Questa condizione si ha per un angolo di zenith di 45°.

I numeri caratteristici per le equazioni che seguono sono il numero di Prandtl e il numero di Rayleigh. I parametri termofisici utili per il calcolo sono ottenuti per una pressione ambiente e una temperatura media tra superficie e ambiente. Tutte le equazioni fanno riferimento alla nota [20]

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (8.2)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_{\text{sup}} - T_{\text{air}})L^3}{\mu\alpha} \quad (8.3)$$

Superficie verticale

$$Nu^T = \bar{C}_l \cdot Ra^{1/4} \quad (8.4)$$

$$Nu_t = \frac{2}{\ln(1 + 2/Nu^T)} \quad (8.5)$$

$$Nu_t = \frac{C_t^V Ra^{1/3}}{(1 + 1.4 \cdot 10^9 \cdot \frac{\text{Pr}}{Ra})} \quad (8.6)$$

$$Nu = [(Nu_t)^m + (Nu_t)^m]^{1/m} \quad m = 6 \quad (8.7)$$

Superficie orizzontale con scambio verso l'alto

$$Nu^T = 0.835 \bar{C}_l \cdot Ra^{1/4} \quad (8.8)$$

$$Nu_t = \frac{1.4}{\ln(1 + 1.4/Nu^T)} \quad (8.9)$$

$$Nu_t = C_t^U \cdot Ra^{1/3} \quad (8.10)$$

$$Nu = [(Nu_t)^m + (Nu_t)^m]^{1/m} \quad m = 10 \quad (8.11)$$

Superficie orizzontale con scambio verso il basso

$$Nu^T = \frac{0.527}{(1 + (1.9/\text{Pr})^{9/10})^{2/9}} \cdot Ra^{1/4} \quad (8.12)$$

$$Nu_t = \frac{2.5}{\ln(1 + 2.5/Nu^T)} \quad (8.13)$$

Molte delle equazioni precedenti utilizzano le seguenti variabili che sono funzione del numero di Prandtl

$$\bar{C}_l = \frac{0.671}{(1 + (0.49/\text{Pr})^{9/16})^{4/9}} \quad (8.14)$$

$$C_t^V = \frac{0.13\text{Pr}^{0.22}}{(1 + 0.61\text{Pr}^{0.81})^{0.42}} \quad (8.15)$$

$$C_t^U = 0.14 \left(\frac{1 + 0.0107\text{Pr}}{1 + 0.01\text{Pr}} \right) \quad (8.16)$$

Convezione forzata

Questo approccio prevede la conoscenza della velocità del vento e la sua direzione per identificare le equazioni caratteristiche migliori. Per quanto riguarda il problema in esame, poiché non si dispone di dati relativi a queste variabili, si fanno delle assunzioni relative alla direzione del vento e alla sua intensità. In particolare l'intensità del vento è presa di 1m/s e la direzione ortogonale alla superficie ricevente. Il modello che si è scelto di sviluppare calcola un coefficiente di scambio convettivo medio per una determinata geometria facendo riferimento al lavoro [18] in nota bibliografica. La geometria presa per il ricevitore è una geometria quadrata con asse perpendicolare al flusso che circonda il ricevitore come mostrato nell'immagine sotto.

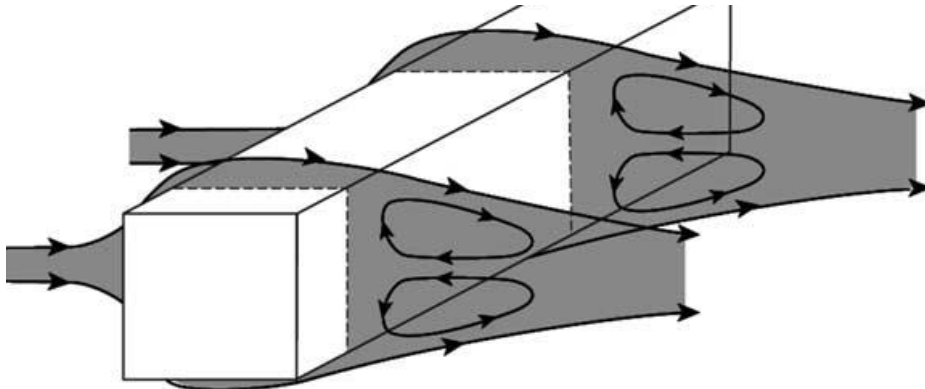


Figura 40 Deflusso dell'aria su un condotto quadrato [17]

Il comportamento per questa geometria è rappresentato dalla seguente equazione:

$$Nu_{air} = 0.149 \cdot Re_{air}^{0.699} \quad (8.17)$$

dove Re è il numero di Reynolds. La formula vale per Re compreso tra i 2000 e i 6300. In questo caso Re deve essere calcolato con un diametro equivalente secondo la seguente formula.

$$d_{eq} = \frac{p_{ext}}{\pi} \quad (8.18)$$

Dove p_{ext} è il perimetro della sezione scelta. Dal numero di Nusselt segue poi il valore del coefficiente di scambio termico convettivo globale.

$$h_{conv_for} = Nu_{air} \cdot \lambda_{air} / d_{eq} \quad (8.19)$$

Lo scambio convettivo è definito da:

$$q_{conv_for} = h_{conv_for} A (T_{sup} - T_{amb}) \quad (8.20)$$

La superficie di scambio A è pari all'area esterna del ricevitore. Quest'area viene divisa in due dando forma a due equazioni che considerano l'area posteriore dell'isolante e quella degli elementi in alluminio. In questo modo si ottengono due equazioni distinte che fanno riferimento a due nodi distinti del modello di resistenze permettendo un bilancio più accurato sulla superficie interessata.

Scambio per irraggiamento

Il coefficiente di scambio termico per irraggiamento dipende da alcune costanti e dalla differenza di temperatura tra la superficie e il cielo. È possibile calcolare la temperatura del cielo, nota la temperatura dell'aria e quelle di dew point, con la formula proposta nel Duffie [17]. Nel modello seguente non è tuttavia possibile calcolare la temperatura di bulbo bagnato perché non si dispone dell'umidità relativa dell'aria. Per questo motivo si usa una semplificazione considerando la temperatura del cielo di 8°C inferiore rispetto a quella dell'aria come mostrato da Forristall [19]. È infatti possibile osservare che prendendo la formula del Duffie e una temperatura del bulbo bagnato in un range compreso tra i -20°C e i 30°C la differenza tra T_{air} e T_{sky} è tra i 5°C in un clima caldo e umido e i 30°C in un clima freddo e secco.

$$h_{irr} = \sigma \xi (T_{sup}^2 + T_{sky}^2) (T_{sup} + T_{sky}) \quad (8.21)$$

Lo scambio termico per irraggiamento delle varie superfici è dato da:

$$q_{irr} = h_{irr} A_{sup} (T_{sup} - T_{sky}) \quad (8.22)$$

3) Scambio per conduzione tra parete esterna dell'alluminio e l'isolante.

La formula tiene conto dello scambio termico conduttivo all'interno dello strato isolante in lana di roccia. Questo scambio è proporzionale al reciproco della resistenza termica dello strato isolante per l'area e la differenza di temperatura dello strato isolante :

$$q_{cond_is} = \frac{1}{R_{tot}} \cdot A_{is} \cdot (T_{sup_al} - T_{sup_ext}) \quad (8.23)$$

4) Scambio termico per conduzione nelle pareti del canale in alluminio

L'altro scambio termico per conduzione invece definisce lo scambio che avviene tra parete esterna e parete interna di un corpo cavo. Per questa equazione le due pareti devono avere una temperatura costante lungo il perimetro. Questa condizione è stata assunta per le considerazioni fatte in precedenza.

Per la definizione del flusso termico bisogna definire un fattore di forma SF (shape factor) che caratterizza la geometria scelta.

$$\frac{S}{L} = \frac{2\pi}{\ln\left(1 + \left(\frac{2\pi B}{Pi}\right)\right)} \quad (8.24)$$

L'equazione precedente [20] definisce il fattore di forma in geometrie che hanno uno spessore costante lungo il perimetro ma, purtroppo, il ricevitore in esame ha spessori differenti. In particolare la piastra superiore e inferiore hanno uno spessore di 8 mm mentre ai bordi lo spessore è di 5 mm. Per i seguenti calcoli si è scelto di prendere uno spessore perimetrale costante di 8 mm.

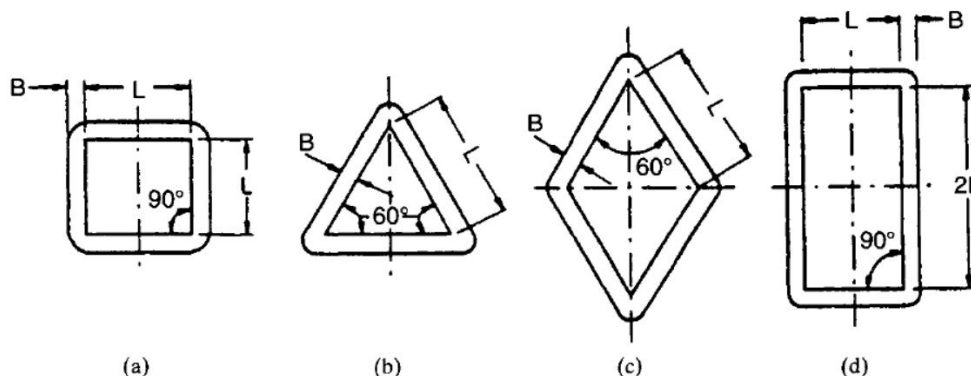


Figura 41 Alcune tipologie di canali con spessori uniformi [20]

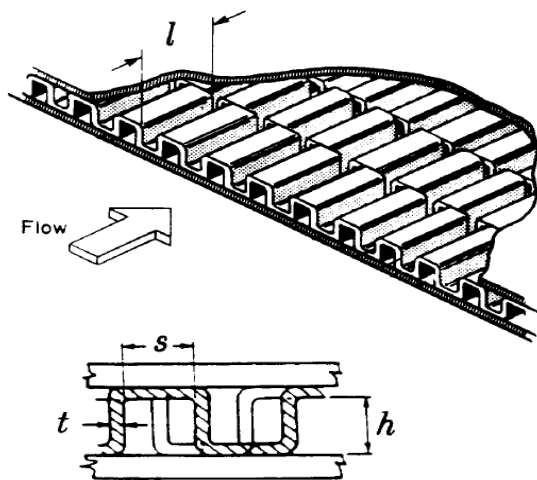
Il fattore di forma viene poi implementato nella formula della conduzione dove si tiene conto del materiale e della differenza di temperatura tra parete interna ed esterna.

$$q_{cond_al} = SF \cdot \lambda_{al} \cdot \Delta T \quad (8.25)$$

5) Scambio termico lato interno

Lo scambio tra fluido e parete interna avviene in presenza di un turbolatore che ha lo scopo di favorire il regime turbolento del fluido termovettore. Per raggiungere questo obiettivo si agisce sulla geometria interna del ricevitore inserendo una serie di alette metalliche che mettono in contatto termico lati opposti del canale interno. Questo ci permette di convalidare l'assunzione di avere una temperatura costante su tutte le

superfici interne perché questo favorisce lo scambio termico. Di seguito è possibile vedere la struttura del turbolatore e alcune caratteristiche geometriche dello stesso.



Parametri geometrici del turbolatore	
S	0.0024 [m]
t	0.003 [m]
h	0.027[m]
l	0.018 [m]
Numero canali	21
Lambda	237 [W/(m K)]
Diametro idraulico	0.0025 [m]

Figura 42 Particolare del turbolatore [21]

L'equazione caratteristica del turbolatore è definita da Manglik e Bergles [21] e viene ottenuta studiando vari tipi di geometrie. Dal confronto dei risultati ottenuti con l'equazione e quelli relativi ai dati sperimentali raccolti per le varie geometrie si osservano incertezze di j del 20%.

Le varie geometrie vengono analizzate con dei numeri adimensionali che sono rapporti delle grandezze geometriche tipiche dei turbolatori. I parametri così come riportati nell'articolo sono i seguenti:

- $\alpha = s/h$
- $\delta = t/l$
- $\gamma = t/s$

L'equazione implementata per il turbolatore in esame è rappresentata da:

$$j = 0.6522 \text{Re}^{-0.5403} \alpha^{-0.1541} \delta^{0.1499} \gamma^{-0.0678} \times (1 + 5.269 \text{Re}^{1.340} \alpha^{0.541} \delta^{0.456} \gamma^{-1.055})^{0.1} \quad (8.26)$$

dove Re è il numero di Reynolds mentre J è pari a $\text{Nu}/(\text{Re} \text{Pr}^{1/3})$. Noti Pr e Re è facile ottenere Nu nel turbolatore dal quale si ricava il coefficiente di scambio termico interno. Pr è il numero di Prandtl e l'equazione va bene per fluidi con Pr tra 0.5 e 15 inoltre questa equazione è valida per qualsiasi numero di Reynolds. Questi numeri adimensionali sono stati calcolati per una temperatura media tra fluido e parete interna e alla pressione dei dati raccolti che era poco sopra i 3 bar. Il fluido termovettore è acqua.

Il modello proposto vuole dare la possibilità di stimare le prestazioni del ricevitore nel caso senza turbolatore e vedere l'effetto di quest'ultimo sul rendimento complessivo. La

nuova configurazione vede quindi un semplice canale rettangolare all'interno del quale scorre il fluido monofase. Per questo canale sono state scelte le correlazioni di Gnielinski come suggerito da Incropera et al. [22].

$$h_{\text{int}} = \frac{4.44\lambda}{d_{\text{id}}} \quad \text{Re}_{\text{int}} \leq 2300 \quad (8.27)$$

$$h_{\text{int}} = \left(\frac{\frac{f}{8} (\text{Re}_{\text{int}} - 1000) \text{Pr}_{\text{int}}}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{6}\right)^{0.5} (\text{Pr}_{\text{int}}^{2/3} - 1)} \right) \frac{\lambda}{d_{\text{id}}} \quad \text{Re}_{\text{int}} > 2300 \quad (8.28)$$

Dove f è il coefficiente di attrito secondo:

$$f = (0.79 \ln(\text{Re}_{\text{int}}) - 1.64)^{-2} \quad (8.29)$$

Le proprietà termofisiche del fluido, Re_{int} e Pr_{int} sono valutati alla temperatura media del fluido operativo.

Ricevitore trapezoidale

Successivamente il modello vuole analizzare l'influenza di una copertura vetrata sul rendimento del ricevitore piano. Da questo momento l'analisi diventa qualitativa perché il modello è validato senza copertura vetrata.

Per questo tipo di analisi si è scelto un ricevitore trapezoidale che è solitamente utilizzato per sistemi di concentrazione di tipo Fresnel. In Figura 43 è rappresentata una sezione tipo. Il ricevitore interno resta lo stesso mentre l'utilizzo di una superficie vetrata impone l'aggiunta di uno strato di isolante laterale che limiti le perdite verso l'esterno. Nel modello esposto in seguito lo spessore di questo isolante varia in funzione dell'angolo α e della distanza vetro-ricevitore che definiscono il tipo di ricevitore.

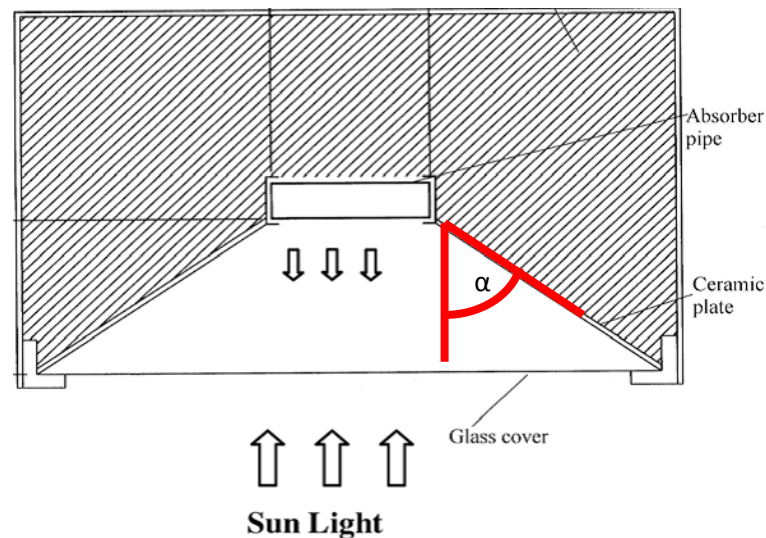


Figura 43 Ricevitore trapezoidale ipotizzato

In questo lavoro si è preso una distanza vetro piastra di 30 mm e un angolo di apertura α del ricevitore pari a metà dell'angolo di bordo. Ricordiamo che questo tipo di concentratore ha un angolo di bordo 78° . Entrambi questi valori possono essere variati, entro i limiti di accettabilità delle formule implementate, per vedere il comportamento di varie tipologie di ricevitori trapezoidali.

Scambio convettivo nella cavità tra assorbitore e vetro

Lo scambio convettivo scelto per il modello trapezoidale considera lo scambio termico all'interno di una cavità rettangolare nella quale, due facce hanno una differenza di temperatura, mentre le altre due sono adiabatiche. Il modello fa riferimento all'articolo in nota [23] della bibliografia le cui equazioni sono riportate anche nell'Incropera [22]. L'equazione esprime il comportamento dello scambio termico a diversi angoli d'inclinazione della cavità rispetto all'orizzontale e in funzione delle dimensioni della stessa. Per il modello si è presa una cavità rettangolare dove il lato più corto è pari alla distanza piastra-vetro (L) mentre il lato più lungo è pari alla media tra la larghezza del ricevitore e la larghezza del vetro (H).

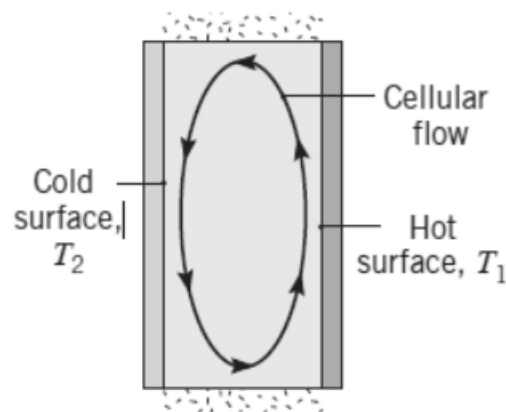


Figura 44 Cella verticale con pareti a temperature differenti [22]

Nel caso in esame l'interno del ricevitore presenta dell'aria alla pressione atmosferica, e non il vuoto spinto che comporterebbe accorgimenti tecnici particolari e costi aggiuntivi. Per il tipo di ricevitore preso l'equazione è la seguente:

$$Nu_{cav} = 0.22 \left(\frac{Pr_{cav}}{0.2 + Pr_{cav}} Ra_{cav} \right)^{0.28} \left(\frac{L}{H} \right)^{-0.25} \quad (8.30)$$

Questa equazione è valida per le seguenti condizioni:

$$2 < \frac{L}{H} < 10 \quad (8.31)$$

$$Pr_{cav} < 10^5 \quad (8.32)$$

$$10^3 < Ra_{cav} < 10^{10} \quad (8.33)$$

In questo caso i numeri adimensionali sono riferiti alla cavità interna mentre H e L sono rispettivamente la larghezza media vetro-piastra e la distanza piastra vetro.

Lo scambio radiativo tra le due facce è stato semplificato considerando solo la piastra ricevente e la copertura vetrata come mostrato nella Figura 45.

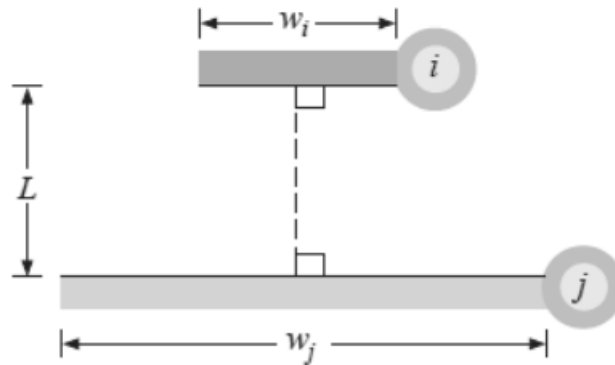


Figura 45 Superfici parallele poste a distanza L [22]

Supposta i la superficie del ricevitore in alluminio e j la superficie del vetro calcoliamo il fattore di vista F_{ij} con le seguenti formule.

$$W_i = \frac{w_i}{L} \quad \text{e} \quad W_j = \frac{w_j}{L} \quad (8.34)$$

$$F_{ij} = \frac{[(W_i + W_j)^2 + 4]^{1/2} - [(W_j - W_i)^2 + 4]^{1/2}}{2W_i} \quad (8.35)$$

Calcolati questi parametri è semplice ricondursi all'equazione dello scambio termico radiativo per questa geometria.

$$q_{irr_cav} = h_{irr_cav} A_{sup} F_{ij} (T_{sup} + T_{vetro}) \quad (8.36)$$

Per gli scambi termici all'esterno del nuovo ricevitore e all'interno del turbolatore valgono le equazioni viste prima.

8.2 Modello numerico

Il modello sviluppato viene svolto utilizzando SIMULINK richiamato all'interno del codice MATLAB. Il codice Simulink è stato pensato per la modellazione e analisi di sistemi dinamici mediante la costituzione di modelli nella forma di schemi a blocchi. Questo permette un approccio semplice alla costituzione del modello poiché è possibile visualizzare il diagramma logico alla base del suo funzionamento. I blocchi sono personalizzabili e già implementati in Simulink e vanno connessi tra loro da frecce direzionali che trasportano le informazioni. Dopo la costruzione del modello, l'utilizzatore deve specificare l'intervallo temporale e il metodo di integrazione che desidera utilizzare. Bisogna infine fare attenzione che il risolutore utilizza un approccio sequenziale e che tutte le equazioni devono essere espresse in forma esplicita.

La prima parte del programma in Matlab permette di scegliere alcune variabili che definiscono le condizioni di scambio termico verso l'ambiente esterno e se è presente o no una copertura vetrata. La logica del programma è espressa graficamente nell'immagine sotto. In funzione delle scelte iniziali il programma si adatta e seleziona il modello in Simulink più appropriato. In particolare nel programma in Matlab è presente un modello per il caso senza vetro e un modello per il caso con vetro.

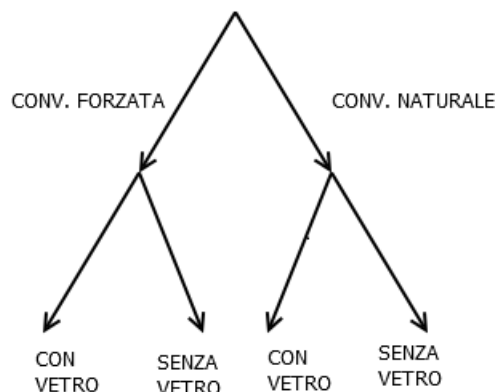


Figura 46 Tipi di scelte del modello in funzione del tipo di convezione e della presenza o meno della copertura vetrata

Dopo le scelte iniziali, segue la definizione di tutte le variabili del modello che vengono implementate. Queste sono rappresentate da una matrice di dati in ingresso nella quale sono raccolti tutti i risultati delle misurazioni precedenti e tra i quali si prende: DNI , T_{in} , T_{out} , T_{air} , portata. Seguono la definizione dei parametri geometrici e le caratteristiche del ricevitore. Le informazioni riportate nel programma in Matlab convergono in una serie di blocchi principali del modello in Simulink, all'interno dei quali sono presenti le equazioni esposte. Questi blocchi principali rappresentano la temperatura di una superficie del ricevitore determinata dal bilancio termico delle varie componenti di flusso che interessano quell'area. Infine i blocchi dialogano tra loro per arrivare ad una condizione di convergenza associata ad un regime stazionario di funzionamento. È possibile vedere il modello costruito in appendice C.

Le proprietà termodinamiche vengono definite utilizzando REFPROP [24]; un database contenente grandezze termo-fluido-dinamiche di molti fluidi.

8.3 Limiti del modello

I limiti del modello numerico dipendono dalle equazioni scelte e dalle assunzioni fatte che hanno portato alla definizione dello schema di resistenze. Innanzitutto è bene precisare che il modello vale solo per un deflusso monofase e che tutte le prove sono state fatte con acqua come fluido termovettore. In teoria è possibile utilizzare un altro fluido, avendo l'accortezza di variare i parametri termo fisici e verificare i limiti per cui sono valide le equazioni, ma non sono state effettuate prove con altri fluidi. Un altro limite è che il modello è valido per dati in ingresso simili ai dati sperimentali utilizzati. In particolare la differenza di temperatura tra ingresso e uscita deve essere bassa (e la portata del fluido elevata). La differenza di temperatura è limitata perché il programma ha bisogno della temperatura media che è fondamentale perché le perdite termiche e gli scambi termici sono calcolati sulla base di essa. Aumentare troppo la differenza tra ingresso e uscita può portare a risultati che discostano dalla realtà.

Un altro limite è relativo alle stime che si possono fare variando l'ampiezza del ricevitore. Questo è dovuto al fatto che modificando questa caratteristica variano sia l'area di scambio lato esterno e interno che la potenza incidente sul ricevitore. Per quanto riguarda le aree di scambio il programma le ricalcola automaticamente. Per il fattore d'intercettazione sono invece implementati i valori calcolati con SOLTRACE per ampiezze dai 50 mm ai 100 mm. Questi valori sono poi interpolati con un polinomio di terzo grado. Il valore viene estrapolato ogni qual volta il ricevitore non opera nelle condizioni di design di 68 mm. Il limite consiste quindi nell'operare nel range per il quale è implementato il fattore d'intercettazione.

Mentre per il ricevitore non coperto il modello è validato sperimentalmente, per il caso con vetro, il modello dà una stima del miglioramento dell'efficienza che potrebbe essere valutata sperimentalmente. I limiti del modello con una copertura vetrata sono rappresentati dall'angolo di apertura del ricevitore e dalla distanza tra vetro e ricevitore. Variando anche solo uno dei due valori variano le condizioni per le quali è valida l'equazione di scambio convettivo nella cavità. È possibile ottenere i limiti di questi valori invertendo le formule relative ai limiti dell'equazione. Questo passaggio non è stato svolto in questo lavoro perché le condizioni prese verificano i limiti dell'equazione e perché angolo di apertura e distanza vetro-piastra non sono state variate.

9 RISULTATI DEL MODELLO NUMERICO

Dal modello in Matlab si ottengono come risultati principali le temperature in uscita e il rendimento termico del collettore solare a concentrazione, in determinate condizioni ambientali. Per confrontare i risultati del modello senza copertura con i dati sperimentali si utilizzano dei grafici Rendimento-Temperatura media ridotta. Il secondo parametro tiene conto delle Temperatura media del fluido, della Temperatura ambiente e della DNI. Questo si ottiene con la seguente formula:

$$T_{m,rid} = \frac{\left(\frac{T_{out} + T_{in}}{2}\right) - T_{amb}}{DNI} \quad (9.1)$$

Possono essere ottenute curve di rendimento che fanno riferimento a diverse condizioni ambiente. Si ottengono curve relative alla convezione naturale o forzata, con o senza turbolatore e infine si analizza il caso di copertura vetrata. Come vedremo dall'analisi di questi risultati è possibile validare il modello termico proposto.

I primi risultati mostrati in Figura 47 Esprimono l'andamento del rendimento termico del collettore in funzione della temperatura media ridotta al variare delle condizione scelte per il modello. La retta esprime l'interpolazione dei dati ottenuti dal lavoro precedente, ed è il riferimento per i modelli sviluppati. Si può osservare come le equazioni prese per la convezione naturale non simulino bene l'andamento dei dati. In particolare l'errore aumenta all'aumentare della temperatura media ridotta. Questo significa che con la convezione naturale le perdite sono sottostimate. Risultati migliori si ottengono con le equazioni in convezione forzata che sembrano seguire bene l'andamento dei dati. Sebbene la zona interessata sia poco ventosa un modello di questo di questo tipo è in buon accordo con i dati sperimentali. In particolare sono state riportate le curve relative a due diverse velocità del vento mostrando come quella a 1 m/s segue meglio i dati raccolti. Per verificare i risultati è stato fatto un controllo con la velocità del vento misurata nella stazione di Legnaro (PD). La stazione si trova a 8 m s.l.m. e i dati fanno riferimento all'archivio meteo presente sul sito dell'ARPAV del Veneto [25]. La velocità media dei giorni considerati era di 1.18 m/s fornendo un'ulteriore controllo sulla bontà del modello.

Data delle misurazioni	Velocità media giornaliera del vento [m/s]
14/11/2014	1.1
19/11/2014	1
21/11/2014	0.6
09/02/2015	1.9
10/02/2015	1.2
11/02/2015	1.3

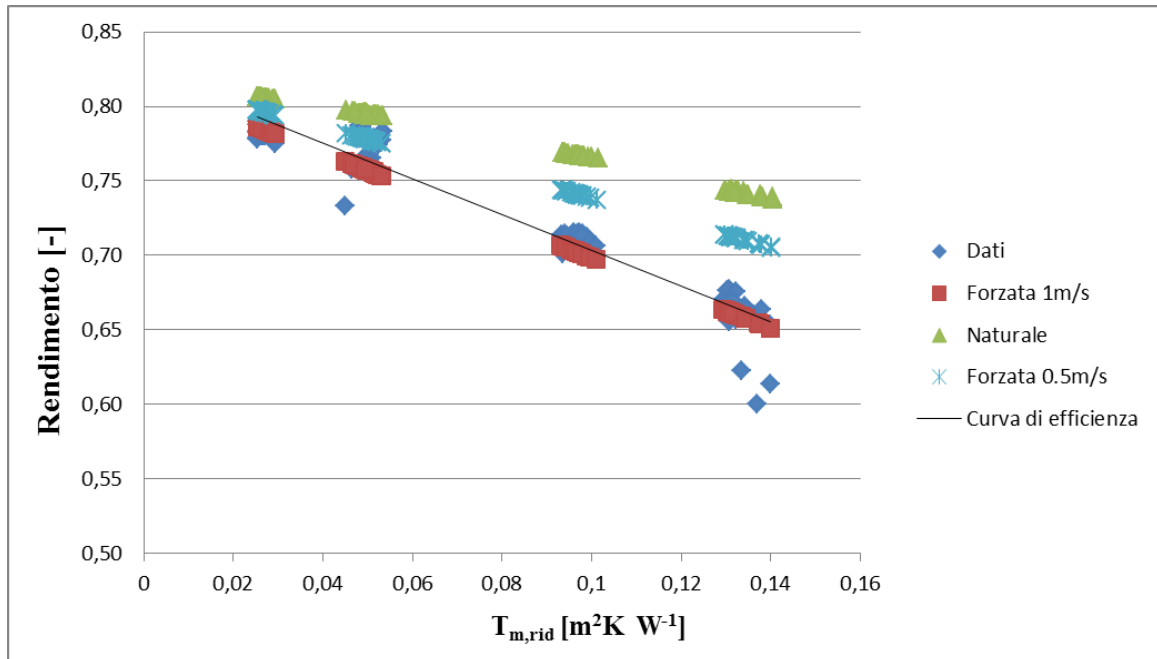


Figura 47 Andamento del rendimento al variare delle condizioni operative scelte

Il modello in convezione forzata sembra quello migliore per predire i risultati ottenuti con i dati sperimentali e, in seguito, verrà utilizzato come riferimento per ulteriori analisi.

È possibile vedere l'influenza del vento nel modello nell'immagine sotto dove sono riportate le curve al variare della velocità del vento. Si vede bene come questo influisca molto sulle perdite termiche diminuendo il rendimento del ricevitore all'aumentare della velocità. Per questo motivo, in seguito, si ipotizza una copertura vetrata per stimare quanto migliorano le prestazioni.

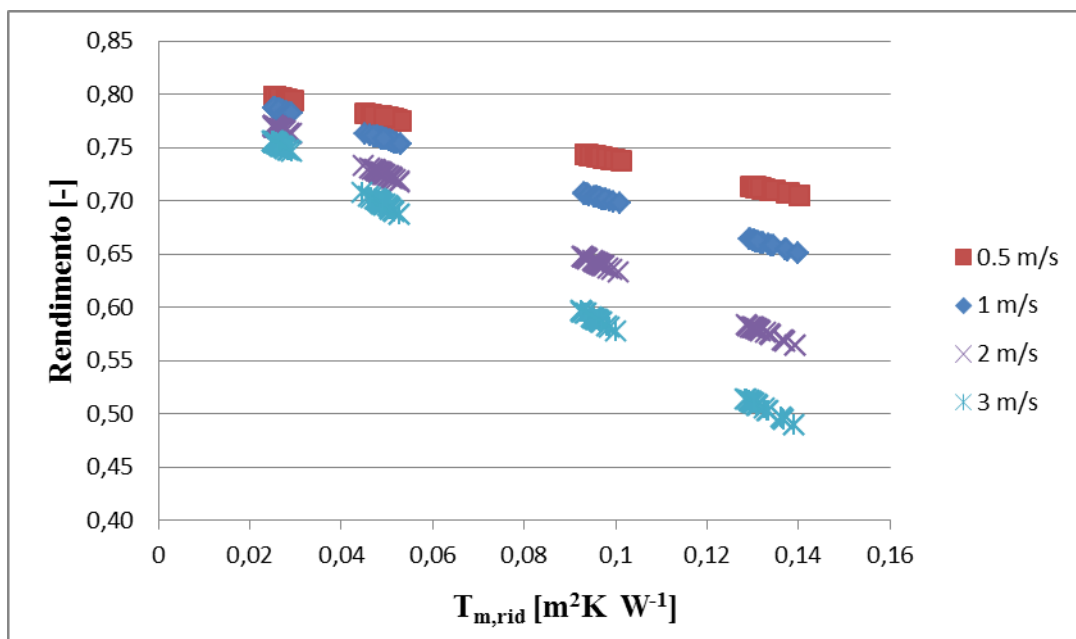


Figura 48 Andamento del rendimento al variare della velocità del vento

Effetto presenza del turbolatore.

Un'ulteriore considerazione consiste nell'analizzare l'andamento dell'efficienza con e senza turbolatore. Il turbolatore è stato considerato per poter realizzare la generazione diretta di vapore in modo stabile durante le misurazioni del lavoro precedente. Per questo motivo il turbolatore è un elemento fondamentale per evitare l'insorgenza del moto stratificato in deflusso bifase. Il motivo per cui si fa questa analisi è capire se nel caso del deflusso monofase ha senso il turbolatore o se basta un semplice canale rettangolare. Possiamo studiare questa condizione nel modello perché, con lo studio fatto in Mirage, è stato dimostrato che la differenza di temperatura all'interno del canale in alluminio anche senza turbolatore è molto bassa e maggiore della temperatura del fluido. Nel caso senza turbolatore sono state implementate le equazioni di Gnielinski viste prima. Nell'immagine sotto si vede che la curva di efficienza in condizioni di deflusso monofase e convezione forzata senza il turbolatore è, come ci si aspettava, più bassa rispetto a quella ottenuta con le stesse condizioni con il turbolatore. Si osserva che la differenza è meno marcata alle temperature maggiori del fluido operativo e che in media la differenza in termini percentuali è del 5.5%. Da quest'analisi possono essere fatte delle considerazioni economiche sull'effettiva utilità di un turbolatore in deflusso monofase.

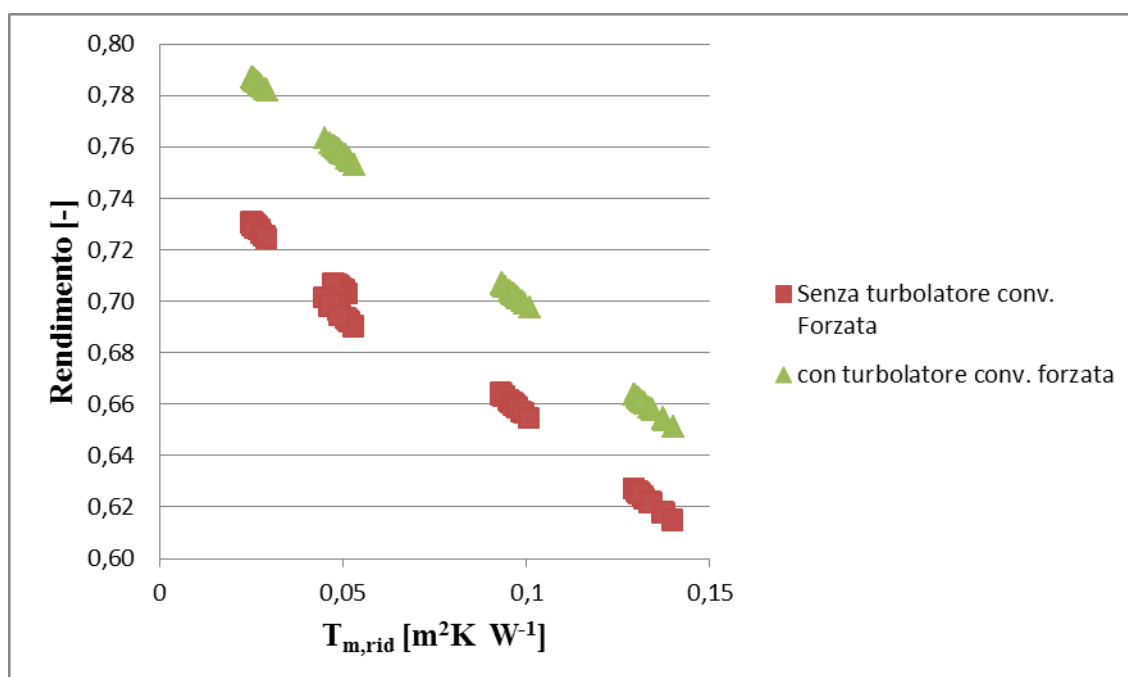


Figura 49 Andamento del rendimento con o senza turbolatore interno

Effetto dell'altezza del ricevitore

Ulteriori analisi possono essere fatte variando l'ampiezza del ricevitore ma, bisogna fare attenzione che varia anche il rendimento ottico del concentratore perché varia il fattore d'intercettazione. Il programma implementa vari fattori d'intercettazione al variare dell'ampiezza e interpola questi risultati. In questo modo è possibile ottenere dei valori del rendimento ottico secondo la formula (1.3) con una larghezza compresa del ricevitore tra i 50 mm e i 100 mm.

Nella Figura 50 è possibile vedere gli andamenti ottenuti dal modello nel caso della convezione forzata e velocità del vento di 1 m/s. In questo caso è possibile osservare che aumentando l'ampiezza del ricevitore aumenta in maniera limitata l'efficienza del ricevitore. Il motivo è che aumentando l'ampiezza del ricevitore si hanno maggiori perdite verso l'ambiente senza avere un significativo miglioramento dell'energia intercettata. Questo perché il fattore d'intercettazione varia poco all'aumentare dell'ampiezza del ricevitore. Diminuendo la larghezza invece si vede che il rendimento complessivo cala perché, sebbene calino le perdite, cala in maniera significativa il fattore d'intercettazione e quindi l'energia catturabile.

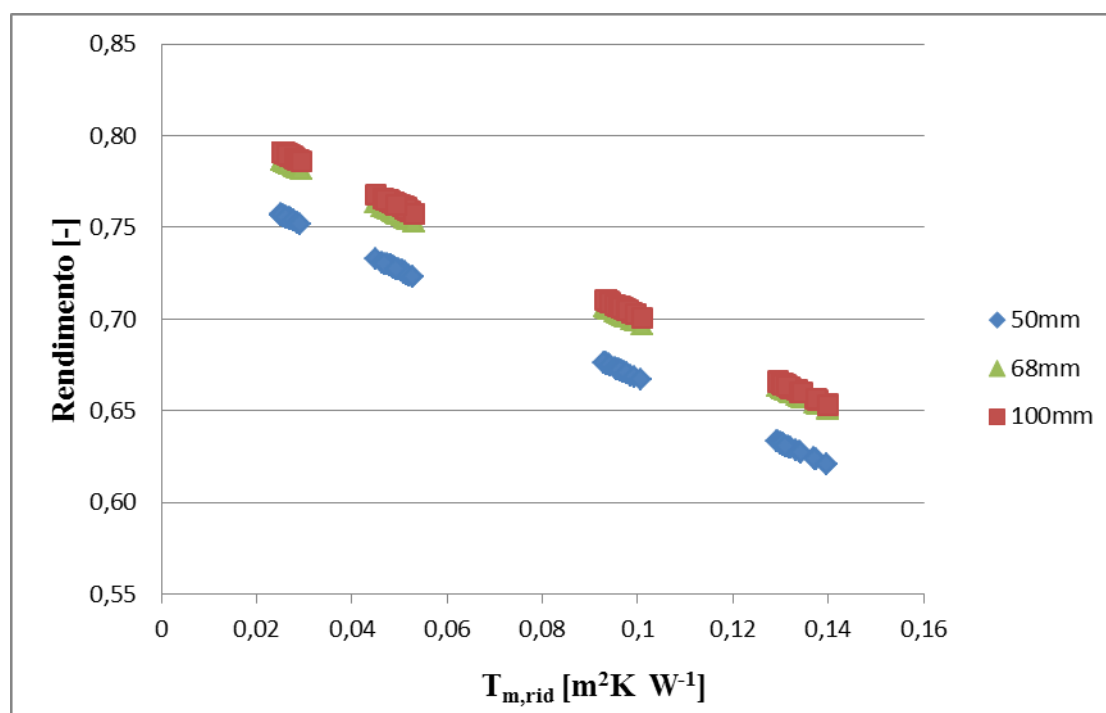


Figura 50 Andamento del rendimento al variare dell'ampiezza del ricevitore piano scoperto

Stima delle prestazioni con un ricevitore ottimizzato

Infine l'ultima analisi esposta nella figura sotto mostra i risultati ottenuti con il ricevitore coperto da una superficie vetrata. La copertura vetrata introduce un'ulteriore perdita ottica legata alle caratteristiche di trasparenza del vetro che non possono mai essere unitarie. Una parte della radiazione incidente viene sempre riflessa in funzione della qualità del

vetro. In questo caso è stato preso un vetro con un coefficiente di trasmissione τ di 0.95 e quindi il 5 % della radiazione incidente viene riflesso. Questo influenza il rendimento ottico del ricevitore, tuttavia ad alti $T_{m,rid}$ l'effetto del vetro diminuisce le perdite termiche. I risultati sono confrontati con quelli ottenuti senza vetro e entrambi fanno riferimento alla condizione di convezione forzata di 1 m/s. Come ci si aspettava il rendimento migliora all'aumentare della temperatura media ridotta e cala al diminuire di questa perché, a causa della copertura, cala il rendimento ottico.

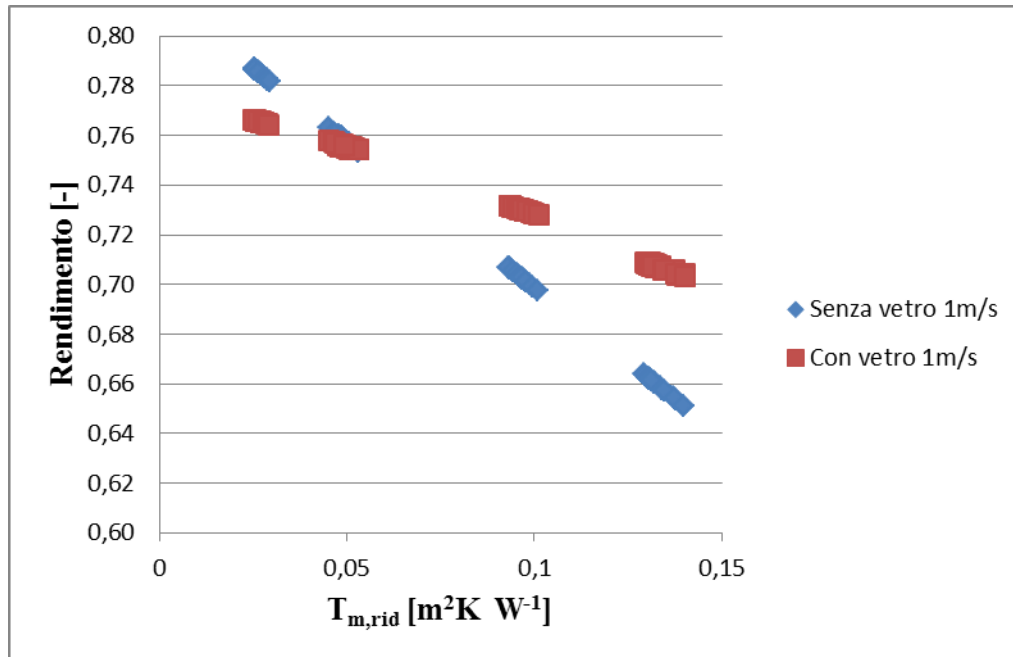


Figura 51 Andamento del rendimento con e senza copertura vetrata

10 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato analizzato un concentratore solare parabolico asimmetrico a fuoco lineare con regione di concentrazione piana. Il lavoro si suddivide in due parti principali. La prima parte comprende lo studio e la misura della radiazione solare incidente sulla regione di concentrazione ottenendo la distribuzione del flusso incidente, il valore di potenza e il fattore d'intercettazione. Quest'ultimo è stato ottenuto per diverse aree d'interesse comprese nella regione di concentrazione.

Dall'analisi bibliografica, è emerso quanto la misurazione del flusso solare concentrato sia fondamentale per la progettazione di collettori avanzati. Si sono osservati molti tipi di strumenti e altrettante tecniche di misura per le varie applicazioni che dipingono la molteplicità delle problematiche relative alla misura del flusso solare concentrato. Tra queste si è scelto di progettare e realizzare un sistema composto da un microsensore HFM raffreddato ad acqua per la misura del flusso puntuale e da un sistema di movimentazione a due assi. Grazie a questa configurazione è stato possibile raccogliere dati discretizzati nella regione focale ed elaborarli attraverso un programma in Matlab per ottenere la mappa del flusso solare concentrato. Integrando numericamente questa mappa è possibile ottenere il valore della potenza incidente su diverse aree d'interesse (da 50mm a 100 mm di altezza). Dividendo questi valori per la potenza riflessa dagli specchi, si ottengono i fattori d'intercettazione relativi alle varie ampiezze. Questi risultati vengono confrontati con quelli ottenuti da un modello ottico sviluppato in ambiente SOLTRACE. Tale programma permette di costruire un modello ottico del collettore e risolverlo con una tecnica di ray-tracing. Il confronto è stato fatto sovrapponendo l'andamento medio del flusso lungo l'asse z ottenuto dall'analisi dei risultati e il flusso medio ottenuto dal modello in SOLTRACE. Oltre ai vari andamenti è stato fatto anche un confronto sui valori dal fattore d'intercettazione ottenuti dal modello e dai dati sperimentali. Si è visto un buon accordo degli andamenti per un errore ottico totale pari a 4.5 mrad.

La seconda parte del lavoro riguarda lo sviluppo di un modello termico di un ricevitore piano con turbolatore interno. Lo scopo è quello di proporre un modello semplificato per la stima delle perdite termiche in grado di fornire indicazioni per una progettazione preliminare del ricevitore a geometria piana. Per raggiungere questo obiettivo è stata fatta un'analisi in Mirage agli elementi finiti del ricevitore. Dall'analisi qualitativa è emerso che è possibile assumere una temperatura costante lungo il perimetro interno del turbolatore e, lungo il perimetro esterno della parte in alluminio del ricevitore. Questo ha permesso di creare un modello zero-dimensionale, risolto in ambiente Matlab al variare della modalità di scambio termico lato esterno.

I risultati, ottenuti per il solo deflusso monofase entro il ricevitore, hanno mostrato un buon accordo con i dati sperimentali utilizzando una correlazione per la convezione forzata con una velocità del vento di 1 m/s. Come ulteriore verifica si è visto che questa velocità è molto vicina alla velocità media misurata dall'ARPAV nelle vicinanze di Padova. Una volta validato il modello sono state fatte delle analisi qualitative per vedere

come alcuni parametri influenzano la curva di rendimento. In particolare si è visto come la presenza del turbolatore aumenti il rendimento del ricevitore di circa il 5% rispetto al caso senza turbolatore. Se si varia la larghezza del ricevitore si osservano delle variazioni di efficienza che sembrano essere molto legate al fattore d'intercettazione e meno alla variazione delle perdite termiche. Infine si è ipotizzato l'uso di una copertura vetrata che si è rivelata un'ottima soluzione quando si lavora a temperature elevate, perché migliora del 5% il rendimento del collettore alle $T_{m,rid}$ maggiori.

Appendice A

Programma per la riduzione dei dati

```
close all;
clear all;
clc;
%creiamo la matrice dei dati in ingresso composta da tre colonne.
% Posizione-DNI-Tensione per il calcolo del flusso
dataIN=xlsread('Data INSTR 9 9_28_2015 13_58_30',-1);
%Data INSTR 9 9_28_2015 13_58_30
%Data INSTR 9 9_28_2015 14_04_53
%Data INSTR 9 9_28_2015 14_11_19
%Data INSTR 9 9_28_2015 14_31_23
%Data INSTR 9 9_28_2015 14_37_20
%Data INSTR 9 9_28_2015 14_43_35
%Data INSTR 9 9_28_2015 14_49_52
%ATTENZIONE
%velocità dello strumento in cm/s
v=0.5;
%lo strumento parte da 0.95 cm per come posiziona lo zero
%corsa dello strumento in cm
corsa=13;
%numero di punti presi
%velocità di acquisizione circa 200ms
%R=corsa/v/velocità di acquisizione. Prendere il numero senza virgola
R=130;
%creo la nuova matrice

DATIAQ=dataIN;
%creo i vettori colonna che definiscono la distanza delle misure prese dal bordo degli
specchi
v1=33*ones(R,1);
v2=152*ones(R,1);
v3=273*ones(R,1);
v4=394*ones(R,1);
v5=515*ones(R,1);
v6=635*ones(R,1);
v7=756*ones(R,1);
v8=875*ones(R,1);
v9=995*ones(R,1);
v10=1115*ones(R,1);
x=[v1;v2;v3;v4;v5;v6;v7;v8;v9;v10];
%nuova matrice che tiene conto del vettore posizione lungo x alla quarta
%colonna
DATI=[DATIAQ x];
%nuovi valori di y che tengono conto del fatto che l'acquisizione parte da
%0.95cm
```

```

y_corr=DATI(:,1)+9.5;
DATI=[DATI y_corr];

%Programma per la riduzione di dati raccolti durante le misurazioni
%i dati sono una misura di corrente e di tensione per ogni punto dello
%strumento
%da questi dati con i valori di dati dalla calibrazione otteniamo la
%temperatura sup e il flusso
%calcolo della resistenza a To
%costante data dalla calibrazione
%e=0.285596; %f=114.0214;%tiene conto della compensazione perché il cavo è molto
lungo
%To=23 °C
%R0=e*To+f;
%calcolo della resistenza ai valori di tensione e corrette misurati dallo strumento
%Vrts Tensione termoresistenza %Irts Corrente termoresistenza
%amplificatore non presente %formula implementata nell'agilent
%R=(Vrts/Irts)+R0;
%calcolo della temperatura dati i valori di resistenza
%c e d sono coeff dati dalla calibrazione
%c=3.501445; %d=418.85;
%T=c*R+d;% in °C
%in realtà abbiamo visto che la T è costante quindi prendiamo:
T=21;% °C
%calcolo dei valori di flusso data tensione misurata e dalla resistenza
%g e h sono coeff
g=0.369917;%microV/W/cm2/°C
h=308.6219;%microV/W/cm2
%tensione del misuratore di flusso
Vhfs=DATI(:,2);%attenzione che è data in microV
%calcolo flusso
q=10000*(Vhfs*10^6)/(g*T+h); % W/m2

%DNI già data dallo strumento
%perché implementata nell'agilent
%DNI=tensione*123762.4
%vettore della DNI
DNI=DATI(:,3);
%posizione y data
%formula implementata nell'agilent
%posizione=15mm/V*tensione
%vettore delle y
y=DATI(:,5);

%creazione della griglia dove viene creata la matrice di valori che
%interpola quelli dati
%ATTENZIONE
%Mettere gli estremi corretti e non andare fuori dal campo di valori perché la funzione
interpola in quell'intervallo

```

```

%oltre l'intervallo da NaN e non si riesce a fare la somma utile per il
%calcolo del flusso. Non estrapola i risultati!!
passo_x=0.1; % mm
passo_y=0.1; % mm
[xq,yq]=meshgrid(33:passo_x:1115, 10:passo_y:140);
%vi è il valore di interpolazione con dati x,y e matrice xq,yq
vi=griddata(x,y,q,xq,yq,'cubic');
%figura della densità di flusso e isoflusso
mesh(xq,yq,vi);
hold on;
figure(1);
xlabel('x [mm]');
ylabel('z [mm]');
zlabel('q" [W/m^2]');
plot3(x,y,q,'o');
hold off;
hold on;
figure(2);
contour3(xq,yq,vi,20);
xlabel('x [mm]');
ylabel('z [mm]');
zlabel('q" [W/m^2]');
hold off;

%chiamiamo la Function per interpolare i dati. Questa function usa gli
%stessi vettori in ingresso del metodo precedente ma crea la curva con un
%metodo differente. Usa il comando fit con metodo biharmonic.
%Da come output la superficie: fitresults
%l'accuratezza del metodo:gof
%i vettori dei dati xdata,ydata,zdata
[fitresult, gof,xData, yData, zData] = createFit(x, y, q);
%creiamo la nuova mesh dove elaborare la sup
[xq_fit,yq_fit]=meshgrid(33:passo_x:1115, 10:passo_y:140);
%estrapoliamo la matrice dei risultati simile alla vi del caso precedente
vi_fit=fitresult(xq_fit,yq_fit);

%Integrale della superficie con comando in matlab
%intervalli di integrazione
% x=33-1115
% y=15-135 % indica l'area che si intende prendere come analisi
%sono espressi nella formula seguente
%integriamo la sup per ottenere un valore di flusso
[Integrazione,errrend]=quad2d(fitresult,33,1115,15,135);
Integrazione=Integrazione*10^-6; %per avere il W/m2
%OSS:errrend è l'errore di integrazione

%calcolo della potenza lungo la corsa y per ogni posizione x
%il valore DNI_media_y è la DNI media lungo la y
k=1;

```

```

for l=1:1:10
for i=1:1:R
    DNI_y(k,i)=DNI(R*l-R+i,1);
end
k=k+1;
end
DNI_media_y=sum(DNI_y,2)/R;
Q_inc_y=2.9*DNI_media_y;%in W/m

%calcolo della potenza incidente sulla direzione y con il metodo dei trapezi
k=1;
for l=0:130:R*9
    s=1;
for i=1:1:R-1
    h(k,i)=((q(l+i,1)+q(l+i+1,1))/2);
    base(k,i)=(abs(y(l+i+1,1)-y(l+i,1)))*10^-3;
    Atrap(k,s)=h(k,i)*base(k,i);
    s=s+1;
end
k=k+1;
end
Atrapezi=sum(Atrap,2);
MediaAtrapezi=sum(Atrapezi,1)/size(Atrapezi,1);
%calcolo il vettore colonna nel quale ogni riga è una posizione di misura
%lungo l'asse x
x2=[33;152;273;394;515;635;756;875;995;1115];%espressi in mm

rapporto=Atrapezi./Q_inc_y;
hold on;
figure(7);
plot(x2,Atrapezi,'o');
xlabel('x [mm]');
ylabel('Flusso [W/m]');
figure(8);
plot(x2,rapporto,'o');
xlabel('x [mm]');
ylabel('q-inc/DNI');
hold off;

%sommiamo tutti i punti lungo una x e ne facciamo la media
%quindi facciamo un grafico dei punti medi lungo la y per vedere la
%distribuzione media di flusso
k=1;
for l=0:1:9
for i=1:1:R
    % valore medio lungo la una x
    q_x(k,i)=q(R*l+i,1);
    ymed(k,i)=DATI(R*l+i,5);
end

```

```

k=k+1;
end

qmedio_x=sum(q_x,1)/10;
ymedio=sum(y_med,1)/10;
ymedio_trasp=ymedio';
qmedio_x_trasp=qmedio_x';
qmedio_x_fit=fit(ymedio_trasp,qmedio_x_trasp,'cubicinterp');
q_med_fit=qmedio_x_fit(ymedio_trasp);
hold on
figure(15);
plot(ymedio,qmedio_x,'o');
hold on
plot(ymedio_trasp,q_med_fit);
xlabel( 'z [mm]' );
ylabel( 'qinc medio [W/m^2]' );
hold off
%partendo dalla matrice yq definisco una nuova matrice ristretta ad una
%fascia di ampiezza variabile del mio assorbitore
[m,n]=size(yq);
%ottengo dei grafici centrati a 75mm dove c'è il fuoco teorico
%valore di area che si vuole prendere rispetto al centro
%deve assumere i seguenti valori:55-50-45-40-35-30-25
h=1;
for t=5:1:11;
    val=5*t;
    l=75-val;
    u=75+val;
    k=1;
    for i=1:1:m
        if yq(i,1)>=l && yq(i,1)<=u
            yq2(k,:)=yq(i,:);
            k=k+1;
        end
    end
    [m2,n2]=size(yq2);
    for o=1:1:m2
        xq2(o,:)=xq(o,:);
    end
    vi_fit2=fitresult(xq2,yq2);
    vi2=griddata(x,y,q,xq2,yq2,'cubic');

%sommiamo tutte le righe e colonne della matrice di interpolazione vi
%somma sulle righe
Sr=sum(vi2,2);
sr(h,1)=size(Sr,1);
%somma sulle colonne
Sc=sum(vi2,1);
sc(h,1)=size(Sc,2);

```

```

% somma di tutti i valori della matrice
Tot(h,1)=sum(Sr,1);
% area A=135*(1115-33) mmq
A_vi(h,1)=(1.115-0.033)*passo_y*0.001*(sr(h,1)-1);% mq;
A(h,1)=(1.115-0.033)*passo_y*0.001*(size(yq2,1)-1);% mq;
% numero di punti presi
% sono i numeri dei punti della matrice presa nel calcolo con area ristretta
N(h,1)=sr(h,1)*sc(h,1);
% calcolo della potenza media
q_inc(h,1)=A_vi(h,1)/N(h,1)*Tot(h,1);
% area degli specchi ortogonale ai raggi solari
%(1115-33)*2.9 h specchi
Asp=3.1378;% m^2
% DNImedia
DNIm=sum(DNI,1)/size(DNI,1);
% potenza incidente sugli specchi
Psp=DNIm*Asp;
% rapporto tra q_inc/Psp
eta(h,1)=q_inc(h,1)/Psp;
% riflessività vetro
rho=0.961;
% non ha incertezza
% gamma
gamma(h,1)=eta(h,1)/rho;

% misura dell'incertezza
% A=a*b è nota
a=1.115-0.033;
b=passo_y*0.001*(size(yq2,1)-1);
inc_a=0.001; % in m
inc_b=0.0001; % in m incertezza di spostamento dell'asse dello strumento
% incertezza della moltiplicazione di due misure
inc_A(h,1)=((b^2*inc_a^2)+(a^2*inc_b^2))^0.5; % in m2
% lo strumento sbaglia del 3% rispetto alla misura fatta
% creiamo un vettore che tiene conto dell'errore
inc_vi2=0.03*vi2;
% somma dei punti presi=Tot
% somma della matrice delle incertezze
Sincvi2=sum(inc_vi2,2);
Sinc_vi2(h,1)=sum(Sincvi2,1);
% incertezza di integrazione sul flusso q_inc
inc_i(h,1)=inc_A(h,1)/N(h,1)*Tot(h,1)+A(h,1)/N(h,1)*Sinc_vi2(h,1); % W
% Incertezza totale
Inc_i(h,1)=inc_i(h,1)/q_inc(h,1);
% manca l'incertezza del metodo d'integrazione
% incertezza degli specchi
% incertezza sulla DNI=3%
inc_DNI(h,1)=0.03*DNIm; % W/m^2
% incAspechi

```



```

inc_Asp(h,1)=((1.082^2*0.001^2)+(2.9^2*0.001^2))^0.5; %in m2
%inc prodotto DNI*Aspecchi
inc_Psp(h,1)=((Asp^2*inc_DNI(h,1)^2)+(DNIm^2*inc_Asp(h,1)^2))^0.5; %in W/m2
Inc_Psp(h,1)=inc_Psp(h,1)/Psp;
%Incertezza di eta=q_inc/Psp
inc_eta(h,1)=(((q_inc(h,1)*-
1/(Psp^2))^2*inc_Psp(h,1)^2)+((1/Psp)^2*inc_i(h,1)^2))^0.5;
%incertezza di gamma
% l'incertezza di rho è trascurabile
inc_gamma(h,1)=((1/rho)^2*inc_eta(h,1)^2)^0.5;
h=h+1;
end

```


Appendice B

Programma per il modello numerico del ricevitore

```
clc;
clear all;
close all;
clc;
% E' POSSIBILE VARIARE:
% N-V-T-lr-angolo-s_cav
% ATTENZIONE le formule valgono per un certo intervallo

% Il programma fa un modello semplificato del ricevitore dove si fissa una
% geometria e si possono variare alcune condizioni al contorno.
% in questo programma definiamo tutti i dati utili per il modello in SIMULINK
% Il programma divide a seconda di convezione naturale N=1 o forzata N=0
% e se il ricevitore ha il vetro V=1 o no V=0
N=0;
V=0;
v=1;% velocità del vento m/s
% con turbolatore T=1 o altro T=0
T=1;
% Se si vuole modificare un'equazione bisogna modificarla in simulink nel
% blocco dove è implementata.

% DATI_permodello ottenuti dalle prove sperimentali
DATAIN=xlsread('DATI_permodello',-1);
% il programma lavora per ogni riga della matrice
righe_dati=size(DATAIN, 1);
DNI_vet=DATAIN(:,6); % irradiazione diretta [W/m2]
Tin_vet=DATAIN(:,1); % temperatura di ingresso nel ricevitore [°C]
Tair_vet=DATAIN(:,9); % temperatura dell'aria [°C]
m1_vet=DATAIN(:,3); % portata nel ricevitore [kg/h]
Tout_dati=DATAIN(:,2); % vettore delle temperatura di uscita dei dati [°C]
Tmfl_vet(:,1)=(DATAIN(:,1)+DATAIN(:,2))/2;
% OSS: la matrice dei dati può teoricamente essere variata per dare dei valori di
estrapolazione

% caratteristiche del ricevitore
lr= 0.068;% larghezza ricevitore in [m]
% Si può variare da 0.05 a 0.1 m
epsilon=0.44;% emissività della piastra
sigma=5.67*10^-8;% costante di Boltzman [W/k^4]
s=0.008;% spessore piastra ricevente [m]
lambda_p=237;% conduttività piastra [W/mk]
sal=0.005; % spessore alluminio posteriore [m]
lambda_al=237; % conduttività piastra posteriore [W/mk]
epsilon_e=0.4;% emissività pareti laterali
```

```

se=0.005; %spessore parete laterale in alluminio [m]
lambda_e=237; %conduttività parete laterale alluminio [W/mk]
L=1.2;%lunghezza ricevitore [m]

%valori di gamma ottenuti con soltrace per un errore ottico globale di 4.5mrad
%valore fa riferimento a ampiezza del ricevitore tra 50 e 100 mm
ampiezze_ric=[0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.1];
gamma_dato=[0.9508 0.9781 0.9877 0.991 0.992 0.9923];%valori di gamma per le varie
ampiezze
gamma_interp=interp1(ampiezze_ric,gamma_dato,lr,'cubic');
% coeff. di assorbimento sup. ricevente
alfa=0.8647;

%pressioni operative
patm=101.325;%pressione atmosferica [kPa]
pf=303.957;%pressione fluido termovettore [kPa]
pcav=patm;%pressione della cavità trapezoidale=pressione atmosferica

%parametri dell'isolante
epsilon_b=0.89;% emissività isolante
sb=0.02;%spessore isolante posteriore in [m]
lambda_b=0.04;%conduttività isolante [W/mk]

%parametri che definiscono la geometria del ricevitore trapezoidale
if V==1
    Tau_vetro=0.95; %trasmissività del vetro
    epsilon_v=0.2; %emissività del vetro
    s_cav=0.03; %spessore cavità [m]
    angolo=0.68;%angolo preso per definire la geometria del ricevitore trapezoidale in
radianti
else
    Tau_vetro=1;
    epsilon_v=0;
    s_cav=0;
    angolo=0;
end

%tipo di ricevitore interno
%turbolatore
if T==1
    Areain=0.000136*(lr/0.068); %area della sezione interna per calcolare la velocità del
fluido[m^2]
    hApass=(Areain/lr)*(lr/0.068);%[m]
    Didrin=0.0025411;%diametro idraulico turbolatore [m]
    Aint=0.208125*L*(lr/0.068);%area di scambio del turbolatore[m^2]
else
    Areain=0.00174*(lr/0.068);%[m^2]
    Didrin=0.057;%diametro idraulico interno [m]
    Aint=0.122*L*(lr/0.068);%area di scambio senza turbolatore[m^2]

```

```

end

%caratteristiche del collettore
%Eta_opt=0.82;%rendimento ottico senza vetro e larghezza ricevitore 0.068mm
Eta_opt=0.961*gamma_interp*Tau_vetro*alfa;
RC=42;
Aap=3.427; %area delgi specchi [m^2]

%fluido interno ricevitore
density=1000; %densità [kg/m^3]

Didr=0.068;%lunghezze caratteristiche per conv. naturale [m]
Didre=0.00935;%lunghezza caratte per conv. naturale [m]

if V==1
%aree del ricevitore per definire gli scambi termici che tengono conto
% dello spessore del ricevitore
Ap=lr*L;% area piastra in [m^2]
Ab=lr*L; %area posteriore in [m^2]
Ae=(0.04+s_cav)*L; %area dei bordi [m^2]
Av=(lr+2*s_cav/sin(angolo))*L;%area vetro [m^2]
Ainfin=(lr+2*s_cav/sin(angolo))*(lr+2*s_cav/sin(angolo))*2;
% diametro per lo scambio in convezione forzata [m]
deq=((lr+2*s_cav/sin(angolo))^2+(0.04+s_cav/cos(angolo))^2)/(pi);
HsuL=((lr+(lr+2*s_cav/sin(angolo)))/2)/s_cav;
else
Ap=lr*L;% area piastra ricevente [m^2]
Ab=lr*L; %area posteriore [m^2]
Av=0; %area vetro [m^2]
Ae=0.02*L; %area bordi esterni [m^2]
Ainfin=0.002652*2*(lr/0.068);
deq=(lr*2+0.04*2)/(pi);%diametro equivalente per lo scambio in convezione forzata [m]
end

%definiamo le resistenze degli strati isolanti in funzione del tipo di
%ricevitore
Re=(s_cav*tan(angolo))/lambda_b; %resistenza bordi
Rinfin=0.02/lambda_b; %resistenza iniziale e finale
Rb=(sb/lambda_b); %resistenza posteriore

m=0;
for r=1:1:righe_dati
%dai dati in ingresso creo i vettori colonna che posso usare per
%confrontare i risultati dei modelli
DNI=DNI_vet(r,:);
Tin=Tin_vet(r,:);
Tair=Tair_vet(r,:);
m1=m1_vet(r,:);

```

```

Tmfl=Tmfl_vet(r,:);
%Ora si esegue il programma in funzione delle condizioni scelte in partenza
if N==0 && V==1
    sim('es_18_Totale_con_vetro');
else N==0 && V==0
    sim('es_18_Totale_senza_vetro');
end
if N==1 && V==1

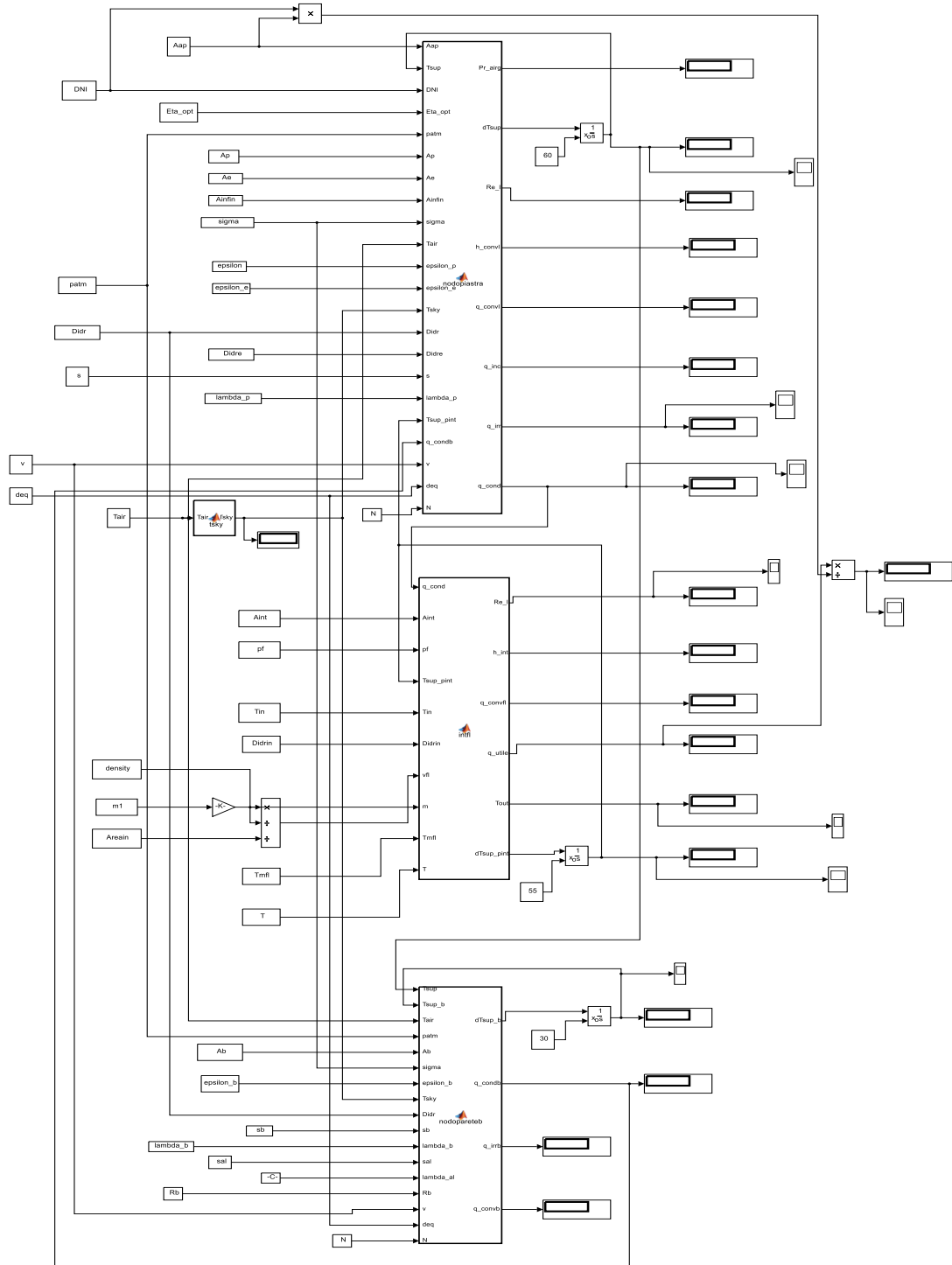
else N==1 && V==0
    sim('es_18_Totale_senza_vetro');
end

m=m+1;
if V==0
    Tout1=Tout2(end,2);
    Tout_dati(r,2)=Tout1;%temperature in uscita modello in colonna 2
    Eff_ris(r,1)=Eff(end,end);%efficienza del modello in colonna 1
else
    Tout_dati_vetro(r,2)=Tout2_vetro(end,end);%temperature in uscita con il vetro
    Eff_ris_vetro(r,1)=Eff_vetro(end,end);%efficienze in uscita con il vetro
end
end

```

Appendice C

Modello in Simulink per il caso senza copertura vetrata



Bibliografia

- [1] K. Lovegrove e W. Stein, Concentrating solar power technology, Cambridge: Woodhead Publishing , 2012.
- [2] J.Ballestrin, S.Ulmer, A. Morales, A. Barnes, L. W. Langley e M. Rodriguez, «Sistematic error in the measurement of very high solar irradiance.» Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 80, pp. 375-381, 2003.
- [3] J. Ballestrin, C. Estrada, M. Rodriguez-Alonso, C. Perez-Rabago, L.W.Langley e A.Barnes, «Heat flux sensors: Calorimeter or radiometers?», Solar Energy, n. 80, pp. 1314-1320, 2006.
- [4] A. Ferriere, B. Rivoire, «An instrument for measuring cocentrated solar radiation: a Photo-Sensor interfaced with an integrating sphere» , Solar Energy, vol. 72 n.3 pp.187-193, 2002.
- [5] Peretta, A. Antonini, M. Armani, G. Nenna, G. Flaminio e M. Pellegrino, «Double-cavity radiometer for high-flux density solar radiation measurements», Applied Optics, vol. 46, n. 12, 2007.
- [6] Schirricke, R. Pitz-Paal, E. Lupfert, K. Pottler, M. Pfander, K.-J. Riffelmann e A. Neumann, «Experimental Verification of Optical Modeling of Parabolic Trough Collectors by Flux Measurement», Journal of solar Energy Enginering, vol. 131, 2009.
- [7] J. Ballestrin, «A non water cooled heat flux measurement system under concentrated solar radiation conditions», Solar Energy, vol. 73, n. 3, pp. 159-168, 2002.
- [8] J.Ballestrin e R.Monterreal, «Hybrid heat flux measuramensystem for solar central reciver evaluation», Energy, vol. 24, pp. 915-924, 2004.
- [9] C.A. Estrada, O.A. Jaramillo, R. Acosta ,C.A. Arancibia-Bulnes, «Heat tranfer analysis in a calorimeter for concentrated solar radiation measuraents», Solar Energy, vol.81, pp. 1306-1313, 2007
- [10] S. Skuìouri, S. Boudila, M. B. Salah e S. B. Nasrallah, «comparative study of different means of concentrated solar flux measurement of solar parabolic dish», 2013.
- [11] C.A.Perez-Rabago, M.J.Marcos, M.Romero e C.A.Estrada, «heat transfer in a conical cavity calorimeter for measiring thermel power of a point focus concentrator», solar energy, vol. 80, pp. 1434-1442, 2006.
- [12] K.-J. Riffelmann, A. Neumann e S. Ulmer, «Performance enhancement of parabolic trough collectors by solar flux measurement in the focal region», Solar Energy, pp. 1303-1313, 2006.
- [13] Schirricke, Björn, Robert Pitz-Paal, Eckhard Lüpfer, 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, Vol. 131, 2009.

- [14] Vatel Corporation, HFM Specifications.
- [15] Vatel Corp., «HFM-6,HFM-7,HFM-8 operator's manual-version 1.0», Christiansburg (VA), 2015.
- [16] Vatel Corporation, Certificate of calibration, 7-2-2015.
- [17] J. A. Duffie e W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process (fourth edition), New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [18] Ephraim M.Sparrow, John P. Abraham, Jimmy C.K. Tong, «Archival correlations for heat transfer coefficients for non-circular cylinders and for spheres in cross-flow», International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp. 5285-5296, 2004
- [19] R. Forristal, « Heat Transfer Analysis and Modelling of a Parabolic Trough Solar receiver Implemented in Engineering Equation Solver», National Renewable Energy Laboratory, October 2003
- [20] Warren M. Rohsenow, James P. Hartnett, Young I. Cho, Handbook of heat transfer (Third edition), McGraw-Hill, 1998
- [21] Raj M. Manglik, Arthur E. Bergles, «Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset strip fin compact heat exchanger», Elsevier ,1995
- [22] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera e D. P. Dewitt, Fundamentals of heat and mass transfer (7th Ed.), Jefferson City: John Wiley & Sons, 2011.
- [23] Lyes Khezzar, Dennis Siginer, Igor Vinogradov, «Natural convection in inclined two dimensional rectangular cavities, Heat Mass Transfer», vol 48, pp. 227-239, 2012
- [24] Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2013.
- [25] http://www.arpa.veneto.it/bollettini/storico/2014/0111_2014_VVENTO.htm
- [26] S. Skouri, S. Bouadila, M. B. Salah e S. B. Nasrallah, Energy conversion and Management, vol. 76, pp. 1043-1052, 2013.