



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo e caratterizzazione di componenti solari  
per applicazioni di solar cooling

*V. Sabatelli, D. Marano, A. Ebolese, P. Colucci, G. Braccio*

Report RdS/2012/130

## SVILUPPO E CARATTERIZZAZIONE DI COMPONENTI SOLARI PER APPLICAZIONI DI SOLAR COOLING

V. Sabatelli, D. Marano, A. Ebolese, P. Colucci, G. Braccio (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

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

Progetto: Studi e valutazioni sull'uso razionale dell'energia: Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva

Responsabile Progetto: Nicolandrea Calabrese, ENEA

## Indice

Sommario .....	4
1 Introduzione .....	5
1.1 Obiettivi generali .....	5
1.2 Articolazione delle attività relative all'obiettivo B .....	6
2 Attività svolte e risultati ottenuti .....	6
2.1 Sviluppo di componenti solari a concentrazione per applicazioni di climatizzazione .....	6
2.1.1 Introduzione .....	6
2.2 Modellazione ottica e termo-fluidodinamica di un collettore solare a concentrazione basato su un sistema ottico del tipo CPC .....	7
2.2.1 Il sistema ottico di concentrazione .....	8
2.2.2 Descrizione del modello ottico e termo-fluidodinamico .....	12
2.2.3 Risultati delle analisi effettuate con software agli elementi finiti e script di Matlab ..	13
2.3 Sviluppo di un prototipo di concentratore solare compatto che utilizza materiali e tecniche costruttive innovative .....	19
2.3.1 Descrizione dei materiale e delle tecniche costruttive utilizzate .....	19
2.3.2 Descrizione delle diverse fasi di prototipizzazione .....	20
2.4 Realizzazione di un simulatore solare per l'esecuzione di prove indoor .....	23
2.5 Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi solari allo stato pre- industriale o di prototipo per applicazioni a bassa e media temperatura .....	26
2.5.1 Analisi dell'IAM in concentratori dotati di sistema di inseguimento .....	27
2.5.1.1 Modificatore dell'angolo di incidenza (IAM) per sistemi a concentrazione .....	27
2.5.1.2 Effetti geometrici che influenzano il comportamento termico di un concentratore parabolico lineare .....	28
2.5.1.3 Effetti geometrici che influenzano il comportamento termico di un concentratore a specchi lineari di Fresnel .....	30
2.5.2 Sperimentazione su sistemi ibridi del tipo Dish/Stirling .....	32
3 Conclusioni .....	35
Riferimenti bibliografici .....	36

## Sommario

Nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA –MiSE, il presente documento contiene gli esiti delle attività teorico-sperimentali condotte nel corso dell'annualità 2011-2012 presso il Centro Ricerche ENEA di Trisaia, relativamente alla linea di attività riguardante lo *Sviluppo e caratterizzazione di componenti solari per applicazioni di solar cooling*, afferente al Progetto sull'utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva.

Le attività hanno riguardato:

1. lo sviluppo di un prototipo di concentratore solare compatto, basato su ottiche del tipo CPC che inizialmente è stato oggetto di uno studio modellistico sia ottico che termo-fluidodinamico al fine di ottimizzare lo scambio termico e massimizzarne l'efficienza alle temperature di lavoro richieste. Successivamente si è proceduto all'implementazione del prototipo utilizzando materiali e tecniche costruttive di tipo innovativo. Durante le varie fasi di realizzazione, il prototipo è stato sottoposto a diversi test al fine di verificarne le caratteristiche termo-meccaniche.
2. la progettazione e realizzazione di un simulatore solare per l'esecuzione di prove indoor su collettori solari di diversa tipologia, al fine di analizzarne le performance energetiche, in vista anche della verifica di modelli matematici per la cui validazione sono richieste condizioni controllate.
3. la sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi allo stato pre-industriale o di prototipo per applicazioni solari a bassa e media temperatura. In quest'ambito sono stati analizzati e caratterizzati gli effetti geometrici che influenzano il comportamento termico sia di concentratori parabolici lineari sia di sistemi a specchi lineari di Fresnel. Inoltre sono state condotte sperimentazioni su sistemi ibridi a concentrazione del tipo Dish/Stirling, ottenendo risultati interessanti dal punto di vista delle performance elettriche e termiche.

## 1 Introduzione

L'impiego dell'energia solare nella stagione estiva per il condizionamento dell'aria costituisce una soluzione tecnica molto interessante dal punto di vista energetico, vista la coincidenza della domanda con la disponibilità di energia solare. Attualmente esistono diverse componenti tecnologiche per la realizzazione di sistemi di raffrescamento solare, tuttavia non esiste ancora una soluzione tecnologica integrata di facile applicazione, con il risultato che gli impianti di questo tipo sono ancora per lo più di tipo sperimentale e come tali molto costosi e poco competitivi.

In quest'ambito, il progetto a cui afferisce la presente attività (*Progetto 3.4: "Utilizzo dell'energia elettrica e solare per la climatizzazione estiva"*) ha lo scopo di definire e sviluppare un sistema integrato che sia robusto, competitivo e di riferimento per il "sistema Italia", in grado di assolvere l'intero compito della climatizzazione sia estiva che invernale. Il progetto consentirà inoltre di comprendere in quali condizioni climatiche, con quali tecnologie e con quale politica di supporto possa essere avviata un'azione che porti ad una diffusione di massa di sistemi di climatizzazione basati sull'energia solare o comunque assistiti da fonti rinnovabili.

Lo scopo principale del progetto è dunque quello di favorire una crescita nel ricorso a queste tecnologie avanzate di climatizzazione degli edifici. Tale obiettivo richiede parallelamente lo sviluppo di:

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

### 1.1 Obiettivi generali

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

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

Nell'ambito delle attività finalizzate allo sviluppo e qualificazione di tecnologie per lo sfruttamento delle energie rinnovabili per il condizionamento estivo, rientra anche la **linea di attività B** oggetto del presente report che specificatamente si focalizza sullo "*Sviluppo e caratterizzazione di componenti solari per applicazioni di solar cooling*".

## 1.2 Articolazione delle attività relative all'obiettivo B

Per il raggiungimento degli obiettivi della presente linea di attività, sono state previste 3 task che hanno avuto come obiettivo:

- B1. Lo **sviluppo di componenti solari a “debole” concentrazione** ( $T_{\text{lavoro}} = 150-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a basso costo, per applicazioni di climatizzazione nel settore civile e terziario e/o di produzione di calore di processo nel settore industriale. Tale attività si è articolato nello studio e nella messa a punto sia del sistema ottico di concentrazione che del sistema di conversione dell'energia solare in energia termica, attraverso lo sviluppo di modelli che hanno permettano di determinare le configurazioni ottiche e termo-fluidodinamiche più adeguate alle varie applicazioni d'interesse.
- B2. La **realizzazione di un simulatore solare per l'esecuzione di prove indoor** su prototipi al fine di analizzare e verificare, in condizioni controllate, le performance energetiche di nuovi componenti solari in vista anche della validazione dei modelli ottici e termo-fluidodinamici sviluppati nella fase precedente. L'attività è consistita principalmente nella progettazione e realizzazione di un sistema di generazione artificiale della radiazione solare che è stato abbinato ad un circuito termo-idraulico, già in dotazione al Laboratorio del CR ENEA Trisaia, per le prove indoor su collettori di diverse tipologie.
- B3. La **sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi** allo stato pre-industriale o di prototipo per applicazioni solari a bassa e media temperatura. A tale scopo si sono utilizzate le diverse stazioni sperimentali di test, già allestite presso il Laboratorio solare del CR ENEA Trisaia (circuiti di prova per collettori a bassa e media temperatura, circuito prova accumuli, circuito di prova per sistemi, ecc.), che consentono di provare i diversi componenti solari in accordo alle vigenti normative europee.

## 2 Attività svolte e risultati ottenuti

### 2.1 Sviluppo di componenti solari a concentrazione per applicazioni di climatizzazione

#### 2.1.1 Introduzione

Scopo della presente task è lo sviluppo di un prototipo di concentratore solare compatto, basato su ottiche del tipo CPC (*Compound Parabolic Concentrator*), che focalizzano la radiazione solare su un ricevitore la cui geometria è stata opportunamente studiata al fine di massimizzare lo scambio termico con il fluido termovettore.

Per il raggiungimento di tale obiettivo sono stati messi a punto opportuni modelli che hanno permesso di determinare le configurazioni ottiche e termo-fluidodinamiche più adeguate all'applicazione d'interesse (l'accoppiamento a macchine frigorifere a Bromuro di Litio a doppio effetto e/o a pompe di calore reversibili acqua/ammoniaca a ciclo avanzato). Tale sistema permetterà di raggiungere valori dell'efficienza termica dell'ordine del 50% a temperature di lavoro comprese tra i 150 e i 200°C.

Il raggiungimento di tali temperature di lavoro consente l'accoppiamento a macchine frigorifere a Bromuro di Litio a doppio effetto e a pompe di calore reversibili acqua/ammoniaca a ciclo avanzato (AHE, GAX). L'utilizzo di queste macchine nella climatizzazione solare si giustifica a fronte degli elevati COP raggiungibili che consentono di ridurre a parità di potenza utile prodotta le

dimensioni del campo solare a patto di disporre di collettori ad elevata efficienza in tali range di temperatura. Le stesse tecnologie che si intendono sviluppare ed ottimizzare possono essere utilmente sfruttate in diversi settori industriali (in particolare quello agro-alimentare) dove vi è una forte richiesta di calore a media temperatura per alimentare diversi processi industriali. Di qui l'ulteriore interesse per lo sviluppo di tecnologie solari a bassa concentrazione che siano nel contempo economiche e facilmente integrabili nel processo produttivo.

Sulla base di quanto detto, le attività si sono articolate nelle due fasi seguenti:

- modellazione ottica e termo-fluidodinamica di un collettore solare a concentrazione basato su un sistema ottico del tipo CPC
- sviluppo di un prototipo di concentratore solare compatto, che utilizza materiali e tecniche costruttive innovative.

## **2.2 Modellazione ottica e termo-fluidodinamica di un collettore solare a concentrazione basato su un sistema ottico del tipo CPC**

Sulla scorta dell'esperienza maturata nella precedente annualità, durante la quale si sono condotte attività teorico-sperimentali finalizzate allo sviluppo ed ottimizzazione energetica di componenti solari a concentrazione in collaborazione con aziende operanti nel settore delle applicazioni solari, si è proseguito il lavoro di analisi numerica e prototipizzazione di componenti solari destinati ad applicazioni a media temperatura, introducendo elementi innovativi sia dal punto di vista delle geometrie che dei materiali da utilizzare per la loro realizzazione.

In particolare è stato sviluppato un prototipo di concentratore solare compatto, basato su un sistema ottico del tipo CPC (*Compound Parabolic Concentrator*) che focalizza la radiazione solare su un ricevitore a geometria piana e del quale è stato studiato il comportamento ottico e termo-fluidodinamico al fine di massimizzare lo scambio termico con il fluido vettore costituito da olio diatermico.

La figura seguente mostra una vista in sezione del concentratore, costituito da:

- un vetro superiore di copertura;
- due superfici paraboliche in alluminio ad alta riflettività (che costituiscono l'ottica CPC);
- un ricevitore composto da un tubo in rame con sovrapposta una piastra captante anch'essa in rame con trattamento selettivo;
- un isolante termico che circonda la struttura e garantisce un adeguato isolamento alle temperature di lavoro richieste (150-200 °C).

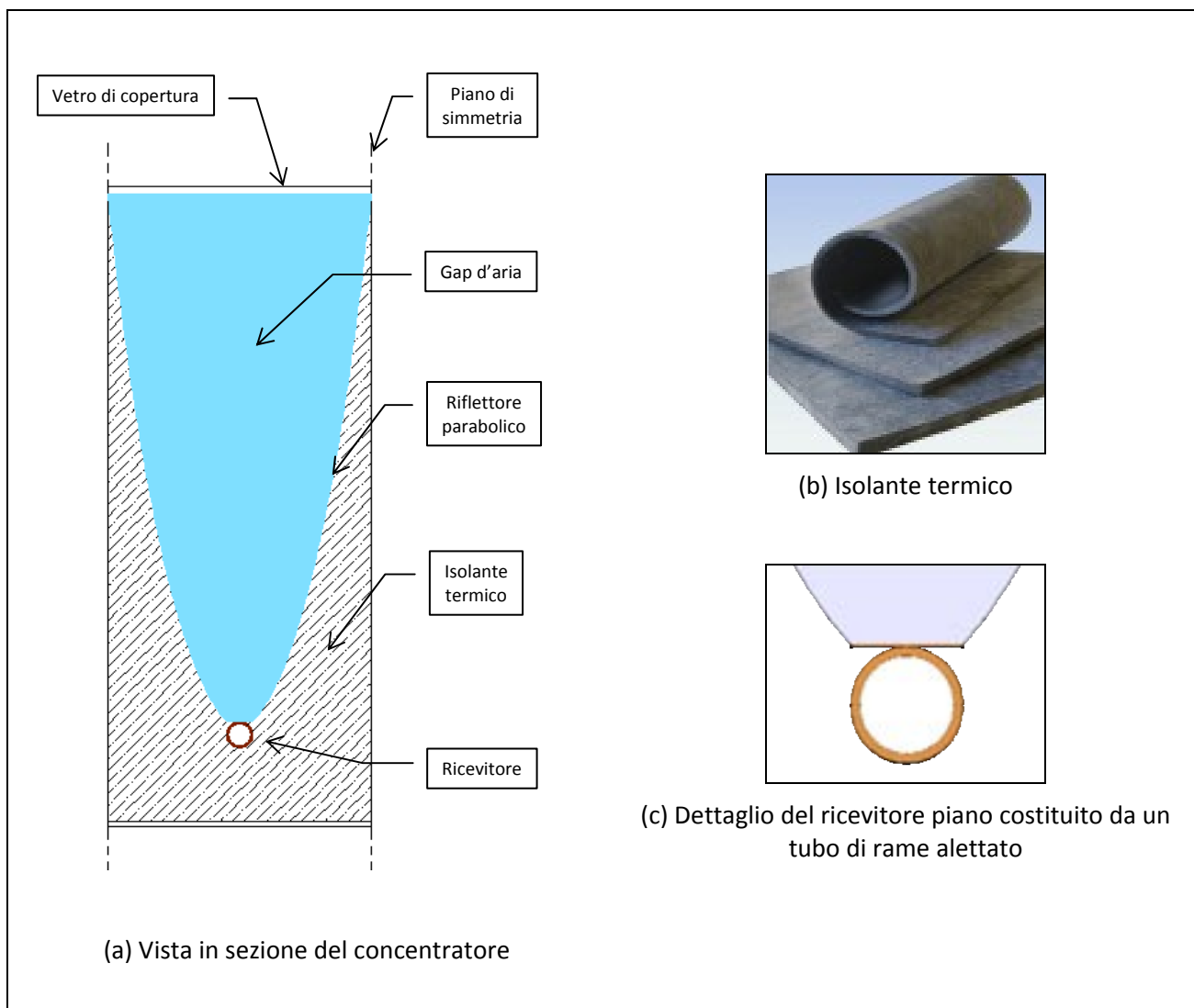


Figura 1 – Struttura e materiali del concentratore CPC

Come illustrato nel paragrafo successivo, per contenere costi e gli ingombri, il sistema ottico è stato troncato ad una altezza tale da ottimizzare il comportamento termico del sistema. Il coefficiente di concentrazione è pari a  $C_R = 10$ , l'intercapedine tra piastra, vetro e superfici paraboliche contiene aria inizialmente a pressione atmosferica.

Nella stessa Figura 1 viene riportata un'immagine ingrandita del ricevitore e della parte inferiore del riflettore dove è possibile distinguere in dettaglio il tubo alettato.

### 2.2.1 Il sistema ottico di concentrazione

Un CPC è un dispositivo ottico del tipo senza immagine capace di concentrare la radiazione solare sino al limite termodinamico. L'ottica senza immagine (*non-imaging optics*) è una disciplina nata a metà degli anni '60 che prevede di ottimizzare il trasferimento del radiazione luminosa senza mantenere l'immagine originaria come nell'ottica convenzionale. Poiché per il solare termico non è importante che si conservi l'immagine del Sole, questa tecnologia è sembrata subito applicabile a questo scopo.



I *Compound Parabolic Concentrators* possono ricevere la radiazione solare con un ampio angolo di incidenza. Utilizzando riflessioni interne, tutta la radiazione che entra nell'apertura, entro l'angolo di accettazione, viene convogliata sulla superficie dell'assorbitore, che è posizionato sul fondo del collettore stesso.

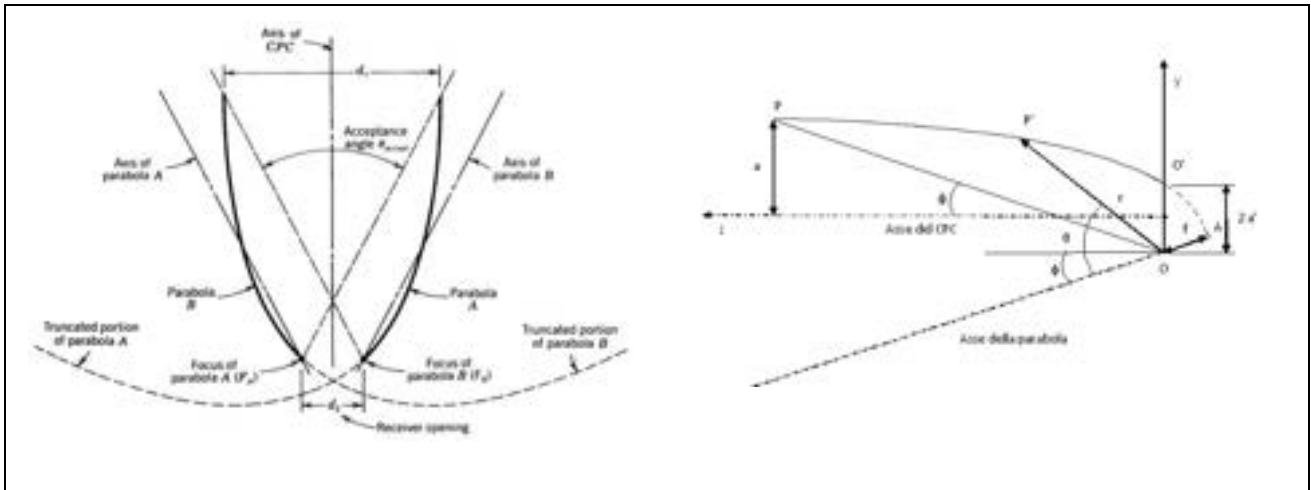


Figura 2 - Profilo tipico di un *Compound Parabolic Concentrator*

Con riferimento alla Figura 2, un CPC è ottenuto da due profili parabolici posizionati in modo che un fascio di raggi paralleli all'asse di ciascuna parabola, formante quindi un angolo  $\phi$  con l'asse ottico del CPC, venga riflesso, da ciascun profilo, in un punto del profilo opposto: il posizionamento è cioè tale che il fuoco di ciascuna parabola giaccia sull'altra. Infine, si sezionano i due profili parabolici in modo che i bordi estremi della apertura di uscita coincidano con i due fuochi. La figura ottenuta per traslazione lungo un asse perpendicolare al piano di rotazione per la lunghezza voluta consente di ottenere il profilo teorico di riflessione di un CPC in 2D.

La traslazione da realizzare affinché il fuoco di ciascuno dei due profili parabolici cada sulla estremità di uscita opposta, che coincide anche con il bordo estremo del ricevitore in uscita, dipende dalla distanza focale  $f$  della parabola. Ne risulteranno quindi fissate tutte le altre caratteristiche geometriche del CPC, ossia: apertura  $d$  e rapporto  $f/d$ , apertura di uscita del CPC e apertura di ingresso  $e$ , di conseguenza, il rapporto di concentrazione.

L'angolo di accettazione  $\theta_{accept}$  è definito dal doppio dell'angolo minimo che deve avere la luce rispetto alla verticale per poter essere assorbita. Il rapporto di concentrazione, definito in generale come rapporto tra l'apertura di uscita e quella di ingresso, è direttamente legato all'angolo di accettazione  $\theta_{accept}$  secondo la formula seguente:

$$C_R = \frac{1}{\sin\left(\frac{1}{2}\theta_{accept}\right)}$$

Ne consegue che un CPC è capace di una concentrazione geometrica pari alla concentrazione termodinamica massima, per ogni dato angolo di accettazione.

Altro parametro che caratterizza un CPC ideale è la sua altezza  $H$  che, in prima approssimazione, è data dal rapporto tra l'apertura e l'angolo di accettazione. Tale parametro evidenzia uno dei difetti principali di un CPC ideale ossia: essere molto alto in rapporto alla sua apertura, sicché, ad esempio, volendo concentrare in 2D una radiazione di divergenza pari a quella solare si dovrebbe utilizzare un CPC di altezza uguale a circa 100 volte la sua apertura. Per questa ragione il campo di applicazione dei CPC è ristretto alla concentrazione di radiazione con divergenza significativamente alta, ossia per concentrare poco con un ampio grado di accettazione angolare, come nel caso in cui siano necessarie grandi tolleranze di inseguimento.

Di contro però, una ulteriore caratteristica di questa tipologia di concentratori che li rende preferibili ai concentratori parabolici lineari (PTC) nei casi precedentemente citati (sistemi a 'debole' concentrazione), è rappresentata dalla possibilità di troncare l'oggetto nella parte finale, ossia di ridurre l'altezza complessiva a parità di accettazione angolare, senza significative perdite di concentrazione. Ciò è dovuto al fatto che la tangente al profilo del CPC in prossimità dell'estremo di ingresso ha una inclinazione che varia lentamente sino a divenire parallela all'asse ottico.

Il grafico seguente mostra il rapporto fra l'altezza e l'apertura di un CPC troncato in funzione della concentrazione ed al variare dell'angolo di accettazione. Con l'ausilio di diagrammi di questo tipo è possibile ottimizzare un CPC in termini di dimensioni geometriche, cosicché esso è dal punto di vista pratico, il dispositivo ottico che per valori di concentrazione dell'ordine di 10-15 soli in 2D, garantisce la massima concentrazione possibile a fronte della più elevata accettazione angolare.

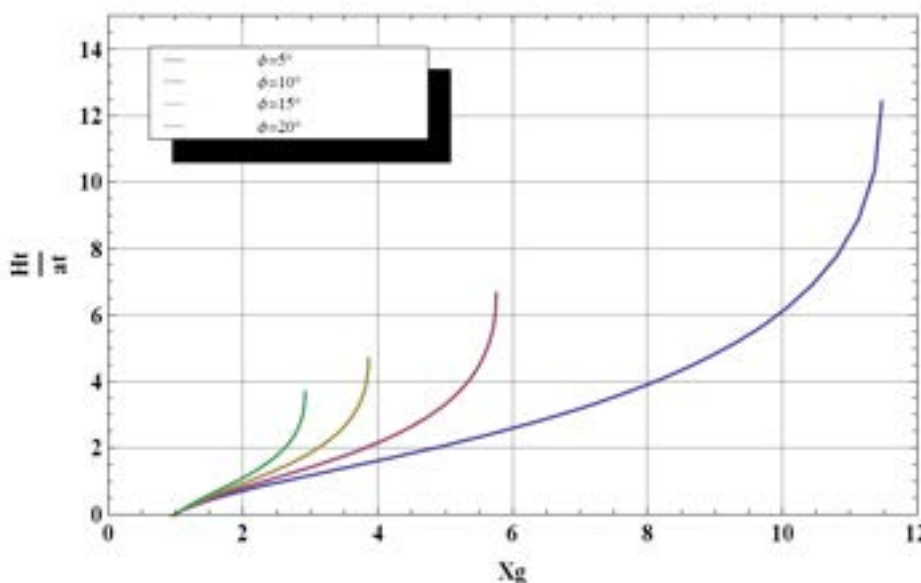


Figura 3 - Rapporto fra l'altezza e l'apertura di un CPC troncato in funzione della concentrazione  $X_g$  ed al variare dell'angolo di accettazione  $\phi$ .

Per quanto riguarda il sistema di raccolta della radiazione solare (*ricevitore*), questo può assumere diverse configurazioni come mostrato nella figura seguente.

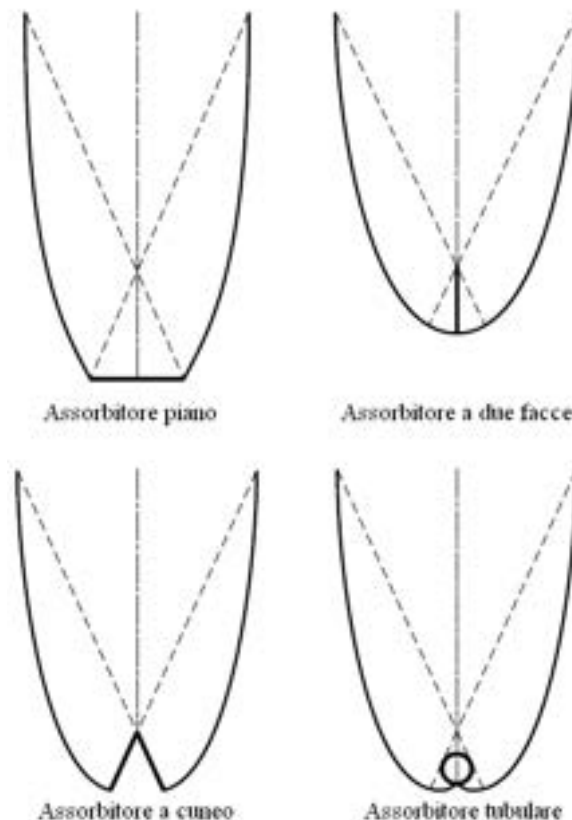


Figura 4 - Possibili configurazioni del ricevitore in CPC simmetrici

Nei concentratori CPC è necessario mantenere l'assorbitore e il riflettore ad una distanza minima, per evitare trasmissione di calore per conduzione (ponti termici), con conseguente diminuzione del rendimento. Allo stesso tempo bisogna mantenere questa distanza la minima possibile poiché le caratteristiche ottiche peggiorano all'aumentare della distanza. Questo fenomeno è accentuato nel caso di assorbitori piani.

Per quanto riguarda infine le modalità di inseguimento della radiazione solare (*tracking*), i collettori CPC possono essere orientati con l'asse giacente sia da nord a sud che da est a ovest.

Quando l'asse è posizionato da nord a sud, il collettore deve ruotare continuamente durante la giornata per inseguire il percorso apparente del Sole e mantenerlo entro l'angolo di accettazione. Aggiustamenti stagionali dell'inclinazione non sono necessari, poiché l'angolo di accettazione nella direzione dell'asse (nord-sud in questo caso) è molto ampio. L'assenza di un sistema di inseguimento, soluzione comunque possibile, fa sì che venga raccolta radiazione solare solamente quando il Sole si trova entro l'angolo di accettazione.

Quando invece l'asse del collettore è orientato secondo la direzione est-ovest, piccoli aggiustamenti stagionali dell'inclinazione permettono al collettore di raccogliere efficacemente la radiazione solare. In questo caso il minimo angolo di accettazione del collettore, dovrebbe essere uguale al massimo angolo di incidenza proiettato su un piano verticale nord-sud. Un collettore CPC stazionario montato in questo modo, dovrebbe avere un angolo di accettazione minimo pari a  $47^\circ$ ; quest'angolo copre la declinazione del sole dal solstizio d'estate a quello d'inverno ( $2 \times 23.5^\circ$ ). Solitamente viene utilizzato un angolo di incidenza più grande, in modo tale da permettere al

collettore di raccogliere più radiazione diffusa. Questa soluzione è la più utilizzata nelle applicazioni pratiche.

### 2.2.2 Descrizione del modello ottico e termo-fluidodinamico

Per stimare le prestazioni del prototipo che si intende sviluppare si è modellato il collettore sia con un algoritmo sviluppato in ambiente MATLAB sia mediante analisi agli elementi finiti utilizzando il programma COMSOL Multiphysics.

Lo script di Matlab modella il ricevitore con l'equazione di Bliss, calcolando il fattore di efficienza, quello di rimozione e la potenza termica utile estratta dal fluido termovettore. Nell'equazione di Bliss compare la radianza assorbita dal ricevitore. Nel nostro caso essa è esprimibile nel modo seguente:

$$S = (\tau\alpha)_n \rho^{n0} \delta C_R G$$

essendo:

- G la radianza sull'apertura,
- $(\tau\alpha)_n$  il prodotto effettivo trasmittanza-assorbanza in condizioni di incidenza normale
- $\rho$  la riflettività degli specchi parabolici
- $n0$  il numero medio di riflessioni della radiazione che attraversa il CPC prima di incidere sul ricevitore
- $\delta$  il fattore di intercettazione (definito come la frazione della radiazione totale captata dal CPC)
- $C_R$  il fattore di concentrazione del CPC (definito dal rapporto tra la superficie della copertura in vetro e quella del ricevitore)
- S la potenza radiante incidente assorbita dal ricevitore

Tale formula è ricavata dalla teoria di Rabl per la quale si rinvia ai riferimenti bibliografici.

Il calcolo tiene conto altresì degli scambi convettivi nell'intercapedine d'aria calcolando i coefficienti di scambio termico in convezione naturale tra piastra e aria e tra aria e vetro, ottenuti valutando i relativi numeri di Rayleigh e di Nusselt. In tale calcolo si impone l'uguaglianza dei flussi termici convettivi tra piastra ed aria e tra aria e vetro ottenendo un'equazione che risolta per via iterativa permette di calcolare sia i coefficienti di scambio termico sia la temperatura dell'aria. Gli scambi termici radiativi sono ottenuti calcolando le radiosità delle superfici che scambiano tra loro calore per irraggiamento, vale a dire le due superfici paraboliche riflettenti, la piastra captante e la superficie del vetro di copertura. In effetti, note dal calcolo termico le temperature delle superfici interessate, e prendendo come incognite le radiosità è possibile ottenere un sistema di equazioni lineari avente come incognite le radiosità medesime. Ottenute queste ultime è possibile il calcolo del flusso radiativo delle superfici interessate, ossia, per come già detto, della piastra, delle due superfici paraboliche e del vetro. Per effettuare il calcolo occorre altresì disporre delle emittanze delle superfici di cui sopra nonché dei fattori di forma; il calcolo di questi ultimi dipende soltanto dalla geometria del sistema. Le temperature superficiali di piastra captante e vetro di copertura si ottengono in maniera iterativa imponendo che il flusso termico totale ( convettivo più radiativo) che rilascia la piastra verso l'alto sia pari al flusso termico totale che il vetro disperde nell'ambiente. Il calcolo della efficienza del collettore viene effettuato scegliendo dodici temperature di ingresso equispaziate tra la temperatura ambiente e la massima temperatura di funzionamento del collettore. Presa ciascuna di esse come input del modello è possibile, come già

si è detto, calcolare il calore utile estratto dal fluido termovettore mediante l'equazione di Bliss e quindi, conoscendo la radianza sull'apertura, l'efficienza del collettore. Poiché il modello fornisce la temperatura di uscita è possibile calcolare la temperatura media del fluido termovettore e, quindi, con il metodo dei minimi quadrati la curva di efficienza disponendo del valore di quest'ultima per ciascuna temperatura media.

Il principale limite dell'analisi in Matlab è che essa non tiene conto di eventuali ponti termici tra piastra in rame e vetro attraverso le superfici paraboliche in alluminio. In effetti data l'elevata conducibilità di quest'ultimo se vi è contatto diretto tra ricevitore ed alluminio e tra questi e il vetro, una elevata quantità di energia termica viene dispersa all'esterno della struttura, come si è potuto verificare con la simulazione in Comsol.

Il modello in Comsol è bidimensionale e pertanto caratterizzato da un'unica temperatura dell'acqua nei tubi assunta pari alla temperatura media del caso reale. Il coefficiente di scambio termico tra acqua e pareti interne dei tubi è stato ottenuto dallo script in Matlab.

Nella simulazione con Comsol si sono utilizzati due modelli fisici interagenti:

- Il *Coniugate Heat-Transfer* che permette di trattare in modo accoppiato il trasferimento di calore per conduzione e convezione nel sistema (mediante le equazioni di bilancio energetico nei solidi e nei fluidi) e il bilancio di massa e quantità di moto mediante le equazioni di Navier-Stokes
- il modulo denominato *Surface to Surface Radiation* che permette di tener conto degli scambi radiativi tra le pareti paraboliche, il ricevitore e la lastra di vetro.

Il modello sviluppato con il software Comsol è stato opportunamente parametrizzato (nel senso che la configurazione geometrica utilizza delle variabili modificabili arbitrariamente) allo scopo di ottimizzare il sistema scegliendo i parametri geometrici che rendono massima l'efficienza alla temperatura di lavoro.

### 2.2.3 Risultati delle analisi effettuate con software agli elementi finiti e script di Matlab

Le simulazioni effettuate hanno permesso di tracciare la curva di efficienza del modulo. La curva di efficienza utilizzata nel presente rapporto è lineare del tipo:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T^*$$

in cui  $T^*$  indica la temperatura ridotta, pari a  $T^* = (T_m - T_a)/G$  dove:

- $T_m$  è la temperatura media del fluido termovettore
- $T_a$  la temperatura ambiente
- $G$  la radianza sul piano di apertura

L'intercetta  $\eta_0$ , detta anche efficienza ottica, è pari all'efficienza a temperatura ridotta nulla; il coefficiente  $a_1 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$  è dato da  $F'U_c/C_R$ , dove  $U_c$  è il coefficiente globale di perdita del collettore,  $C_R$  è il fattore di concentrazione del CPC ed  $F'$  è il fattore di efficienza del collettore.

Le curve ottenute con lo script di Matlab e con il software Comsol hanno le seguenti espressioni:

$$\eta_{Matlab} = 0.603 - 1.16T^*$$

$$\eta_{Comsol} = 0.615 - 0.95T^*$$

Il grafico seguente mostra gli esiti di tali simulazioni, dal cui confronto si evidenzia la diversa capacità dei singoli modelli di stimare le performance energetiche del prototipo a parità di condizioni operative. In particolare le analisi effettuate in ambiente Matlab, sebbene in sostanziale accordo con quelle effettuate con il Comsol, tendono a sottostimare l'efficienza del collettore a causa di approssimazioni nel modello numerico che determinano una sovrastima delle perdite termiche verso l'ambiente esterno.

Dal grafico di Figura 5 e dalle espressioni analitiche si nota che lo scarto tra le due curve aumenta con la temperatura ridotta e che per un valore di quest'ultima pari a circa 0.16 vale circa il 10%.

Come si vede dalla Figura 5 l'efficienza per una temperatura media del collettore intorno a 190°C, una temperatura ambiente di 25 °C e una radianza di 1000 W/m<sup>2</sup> è dell'ordine del 45%.

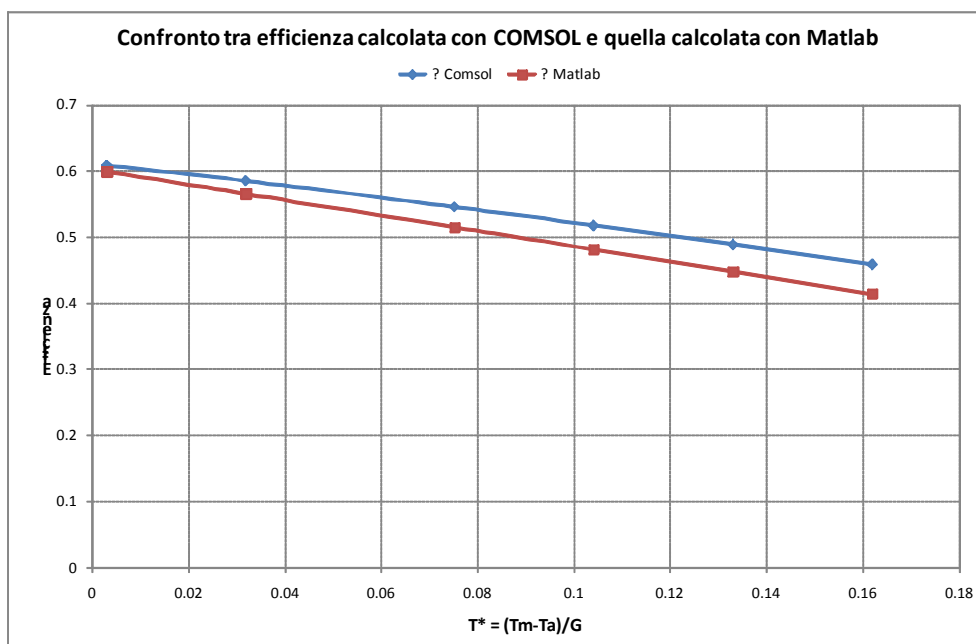


Figura 5 - Confronto tra i modelli utilizzati per l'analisi energetica del prototipo

Nella figura seguente è riportato il campo termico del sistema unitamente a quello delle velocità dell'aria nell'intercapedine. Da essa si nota che lo spessore di isolante è sufficiente a contenere a livelli accettabili le perdite termiche. Il campo termico dell'aria presenta, in prossimità della piastra, un valore di picco intorno ai 200°C. Il campo di velocità mostra che il fluido sale lungo le pareti riflettenti dell'intercapedine e scende nella zona centrale.

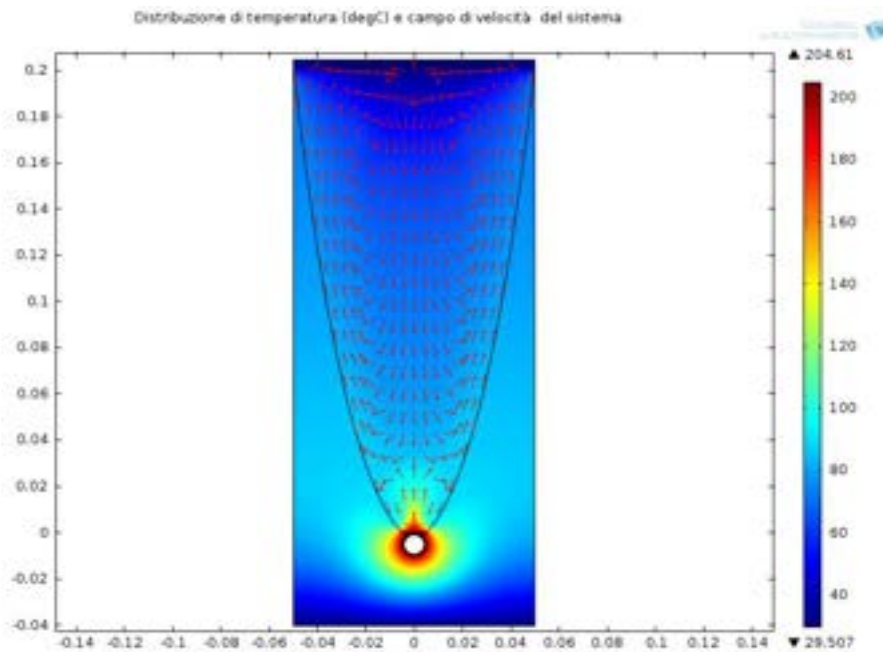


Figura 6 – Campo termico del sistema e distribuzione delle velocità dell’aria

La figura seguente mostra invece un ingrandimento dell’area attorno al ricevitore in modo da evidenziare le caratteristiche del campo termico nelle sue immediate vicinanze.

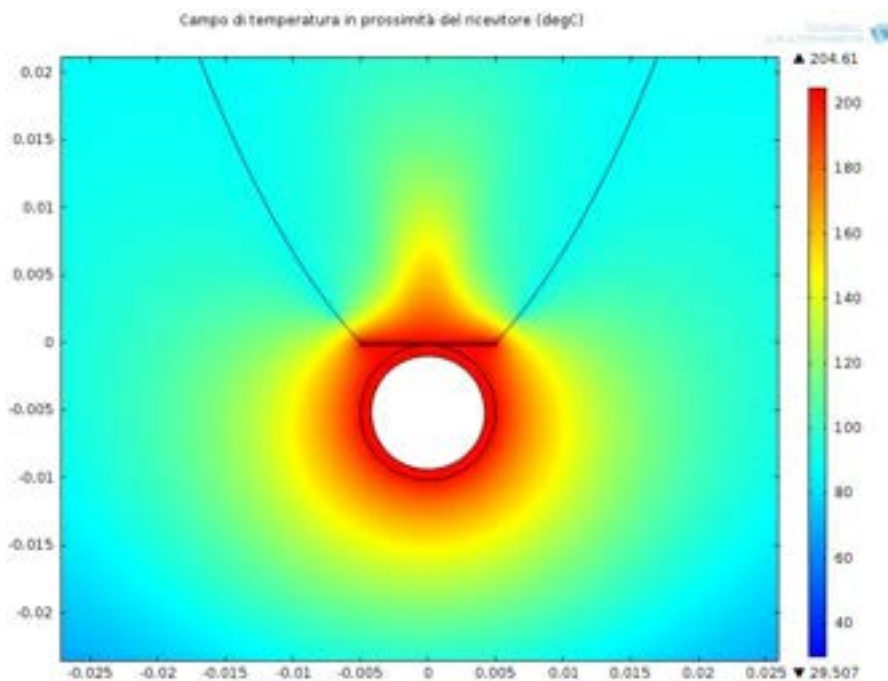


Figura 7 – Dettaglio del campo termico attorno al ricevitore

Nella figura seguente è invece rappresentata la distribuzione del solo campo di velocità dell’aria racchiusa all’interno dell’intercapedine compresa tra ricevitore, parabole riflettenti e vetro di copertura.



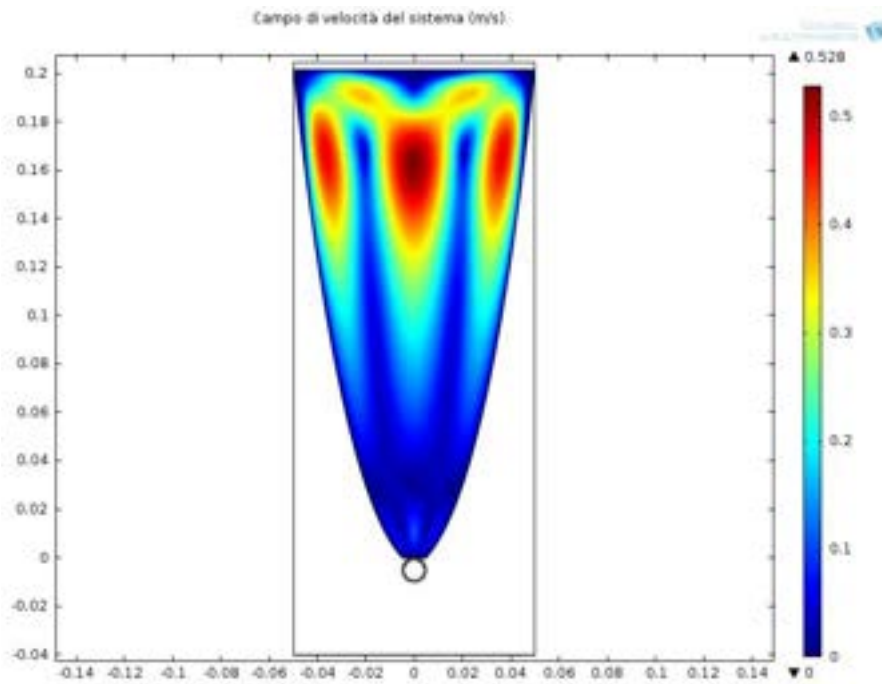


Figura 8 – Distribuzione delle velocità dell'aria nell'intercapedine

Dalla figura si deduce una velocità più alta nella parte superiore dell'intercapedine. Il campo di velocità come del resto il campo di temperatura delle figure precedenti è simmetrico, data la simmetria della configurazione geometrica del sistema, delle condizioni al contorno su di esso imposte e delle equazioni utilizzate nel modello.

Nella figura seguente è rappresentato l'andamento della temperatura della piastra lungo l'asse orizzontale, da cui si nota che la piastra è pressoché isoterma con uno scarto tra massimo e minimo inferiore ad 1 °C; essa è inoltre simmetrica, come deve essere per le ragioni indicate sopra. Il minimo si ha nella zona di attacco del tubo che data la minore temperatura del fluido rispetto alla piastra assorbe calore.



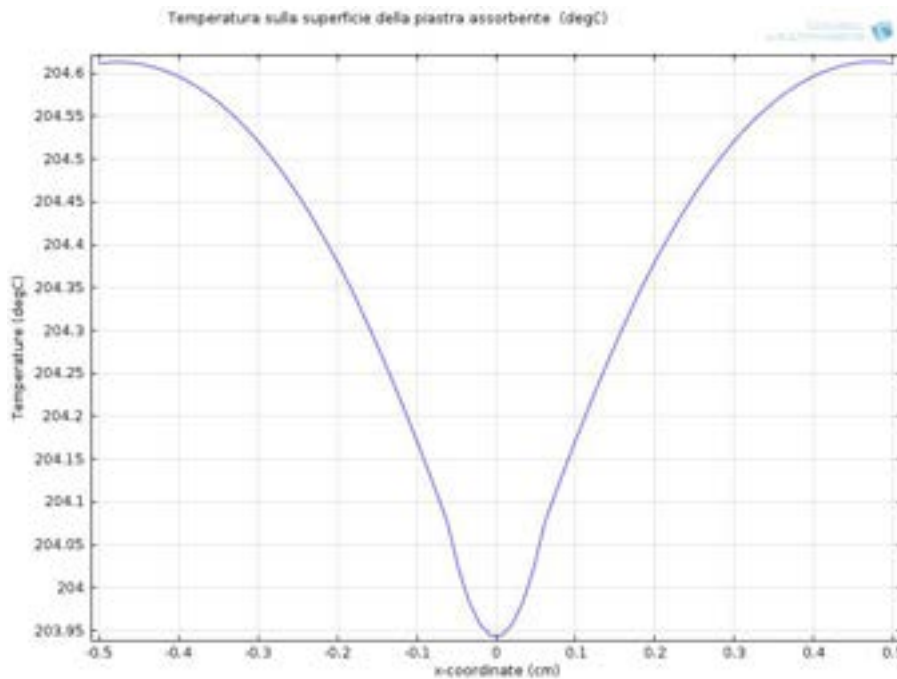


Figura 9 – Temperatura sulla superficie della piastra assorbente

Nella Figura 10 è rappresentato l'andamento della temperatura delle superfici paraboliche in funzione dell'ascissa x relativa all'asse orizzontale. La temperatura varia da circa 90°C in prossimità del ricevitore a circa 70°C in prossimità del vetro.

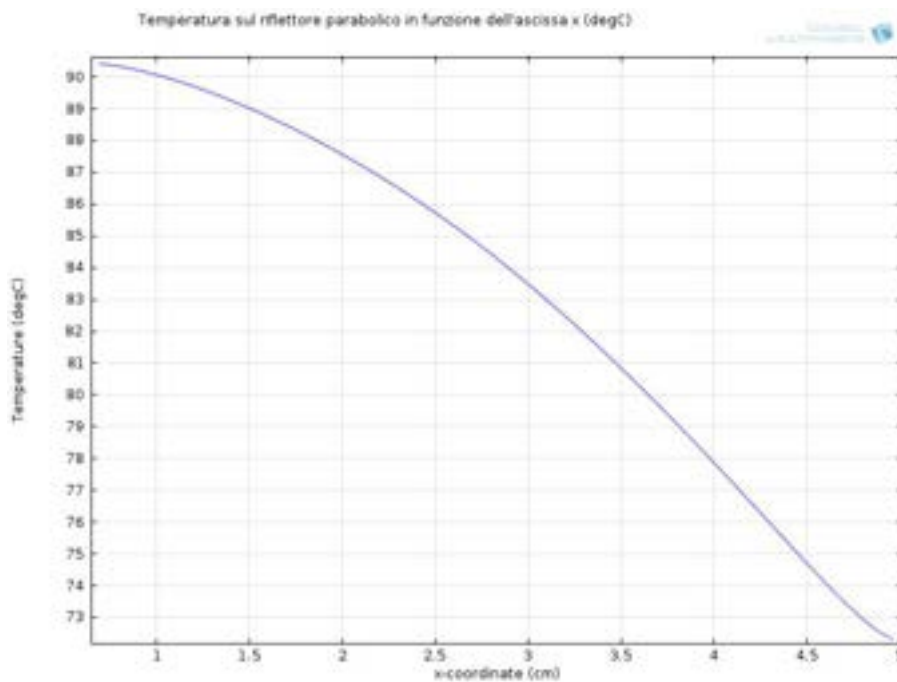


Figura 10 – Andamento delle temperature sulla superficie parabolica

Infine nella Figura 11 è rappresentato l'andamento della temperatura sulla faccia esterna del vetro di copertura. Dalla figura si nota che per effetto del taglio superiore il vetro ha una temperatura

relativamente bassa con un massimo di circa 35 gradi in vicinanza dei riflettori e un minimo di circa 29.5 °C in mezzeria.

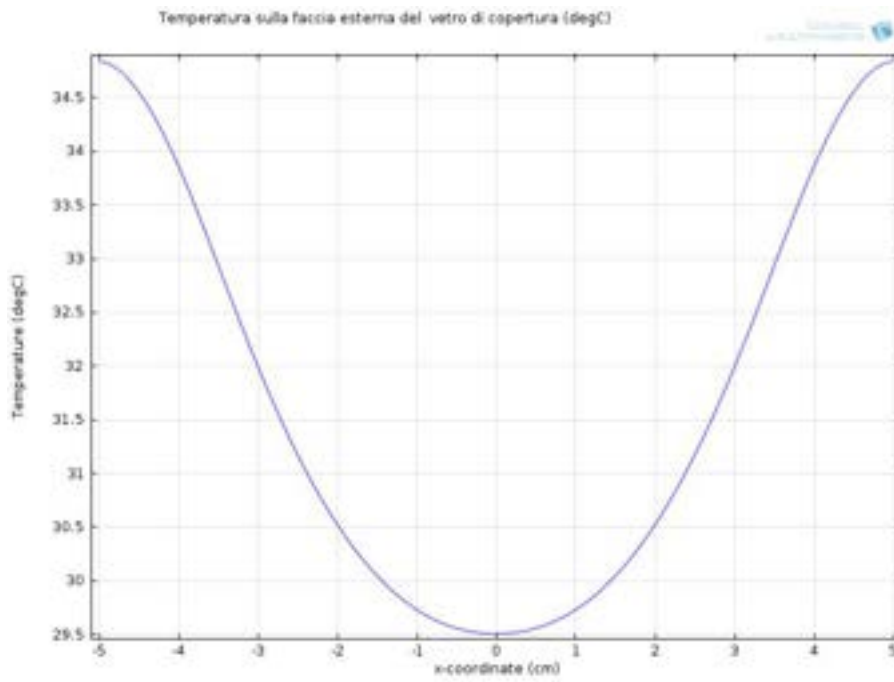


Figura 11 – Temperatura sulla faccia esterna del vetro di copertura

### 2.3 Sviluppo di un prototipo di concentratore solare compatto che utilizza materiali e tecniche costruttive innovative

Alla fase di analisi modellistica del prototipo di concentratore solare è seguita quella della messa a punto di un prototipo sul quale effettuare una campagna di sperimentazione con lo scopo sia di validare gli algoritmi di calcolo messi a punto per la previsione delle performance energetiche del componente, sia di verificare in campo la bontà delle scelte progettuali adottate.

In quest'ambito una sostanziale parte delle attività di ricerca è stata dedicata alla scelta del materiale più idoneo a svolgere il ruolo di supporto per la lamina in alluminio riflettente del paraboloide che, essendo parte integrante del sistema di captazione e conversione della radiazione solare, deve possedere, oltre a elevate caratteristiche di robustezza e resistenza alle alte temperature, anche un alto grado di isolamento per evitare l'innescarsi di ponti termici che inevitabilmente deteriorerebbero le prestazioni dell'intero sistema, come evidenziato nelle numerose analisi modellistiche effettuate nella fase precedente.

Oltre al soddisfacimento delle proprietà di cui sopra, trattandosi di un'attività di ricerca a forte vocazione innovativa, non si è voluto relegare al materiale il solo compito di supporto della lamina di alluminio riflettente ma si scelto di utilizzare un materiale di origine naturale che potesse svolgere anche un ruolo "attivo" nel miglioramento e mantenimento dell'efficienza globale del sistema riflettente.

#### 2.3.1 Descrizione dei materiale e delle tecniche costruttive utilizzate

Lo sviluppo del prototipo di concentratore solare ha richiesto l'impiego di un materiale innovativo. Nello specifico, si è voluto sperimentare, ottenendo significativi ed importanti risultati, un tessuto di fibra di basalto.

Le fibre di basalto sono fibre molto sottili di roccia basaltica vulcanica composta di plagioclasti, pirosseni e olivine. Esse appartengono alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio e alle fibre di vetro ma, rispetto a queste ultime, hanno migliori proprietà meccaniche e fisiche e un costo significativamente inferiore rispetto alle prime (Figura 12).

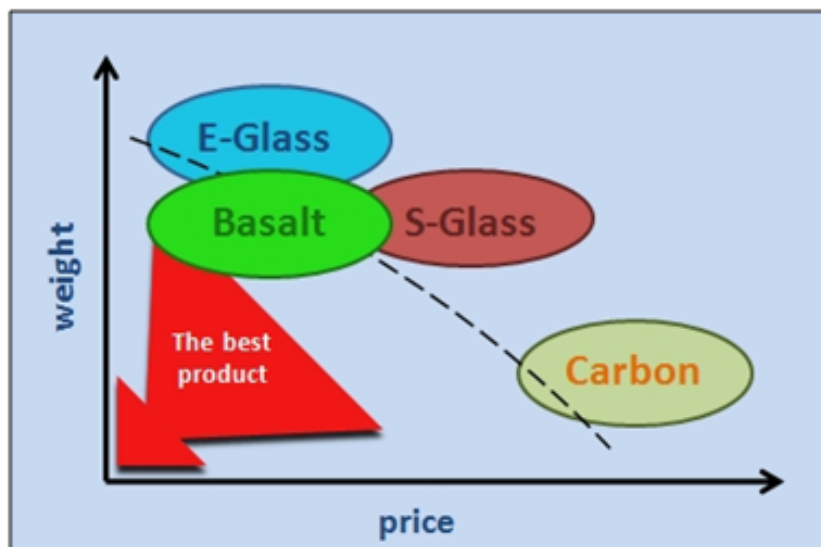


Figura 12 - Rapporto prezzo/peso del basalto rispetto ad altre fibre

Le fibre di basalto hanno tipicamente un diametro compreso tra 9 e 13  $\mu\text{m}$ ; sono un ottimo sostituto delle fibre di amianto in quanto il loro diametro è molto superiore al limite di respirabilità (circa 5  $\mu\text{m}$ ). Le fibre di basalto sono ottimi isolanti termici e acustici, mantengono le proprietà meccaniche anche ad alte temperature e sono molto stabili chimicamente (sia in ambiente acido che alcalino).

Per la realizzazione del composito, sono state utilizzate, oltre al materiale naturale di cui sopra, una resina epossidica appropriata per il materiale in uso, ed una lamina in lega di alluminio ad alta riflettività.

Per la realizzazione delle forme del paraboloide si è fatto uso inizialmente di una struttura semicilindrica in alluminio.

L'attività di prototipizzazione è stata preceduta dalla caratterizzazione della fibra di basalto secondo la norma ASTM D3039, realizzando una serie di provini ed sottoponendoli a prove meccaniche.

### 2.3.2 Descrizione delle diverse fasi di prototipizzazione

Preliminarmente all'attività di ricerca delle diverse fasi di prototipizzazione, sono state determinate le prestazioni meccaniche di 5 (Figura 13) campioni di composito in fibra di basalto e realizzati secondo la norma ASTM D3039/D3039M – 00 “*Standard Test Method for Tensile Properties of polymer Matrix Composite Materials*”.

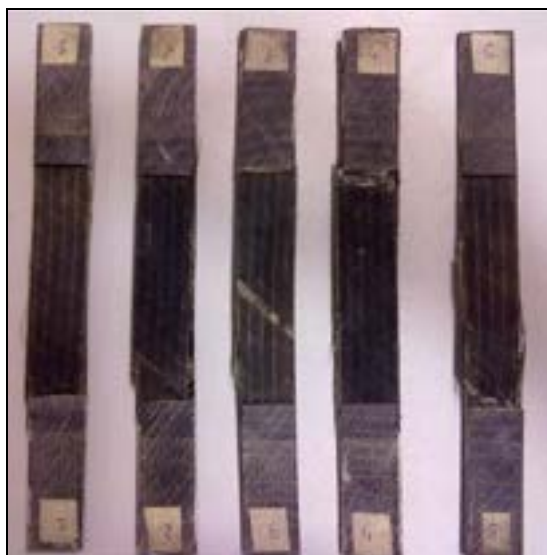


Figura 13 - Campioni di composito in fibra di basalto sottoposti a prove termo-meccaniche

Da una prima analisi (tabella in Figura 14) risulta che le caratteristiche meccaniche sono risultate competitive con i materiali convenzionalmente utilizzati per la realizzazione del supporto del collettore.

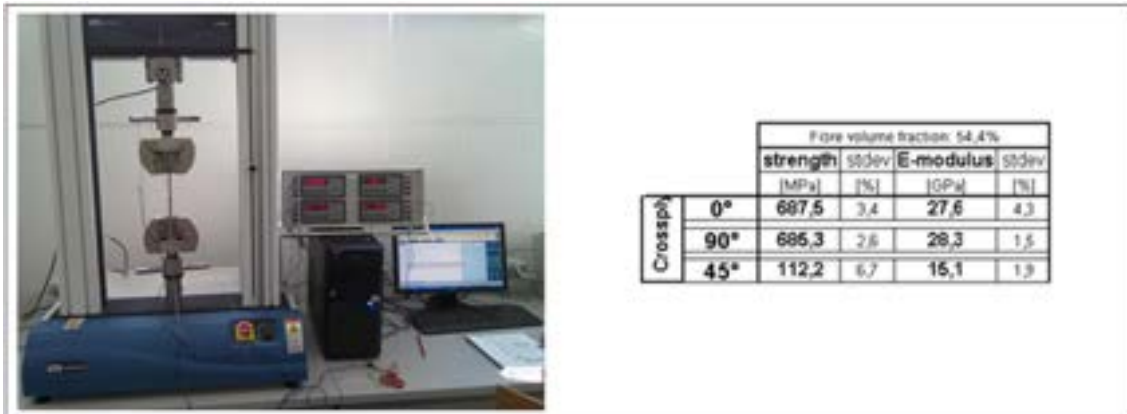


Figura 14 - Caratterizzazione meccanica a trazione della fibra di basalto e proprietà meccaniche ottenute

Di seguito è stata verificata la formabilità del composito, utilizzando una forma in alluminio avente profilo semicilindrico (Figura 15). Il risultato finale ha pienamente soddisfatto le aspettative, ossia, un buon grado di formabilità del tessuto e della resina utilizzata.

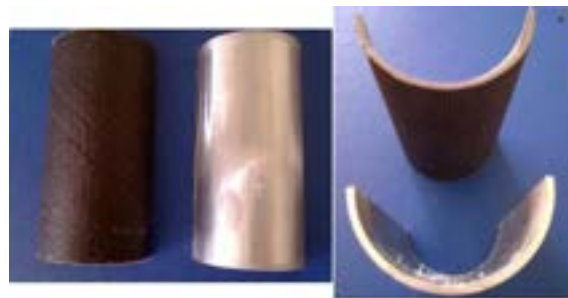


Figura 15 - Fasi della realizzazione del collettore semicilindrico

Il prototipo è stato quindi esposto alla radiazione solare prodotta da una Solar Box (1000 W/m<sup>2</sup>) al fine di verificarne le proprietà termo-meccaniche.



Figura 16 - Solar box, collettore semicilindrico e sistema di acquisizione dati utilizzato

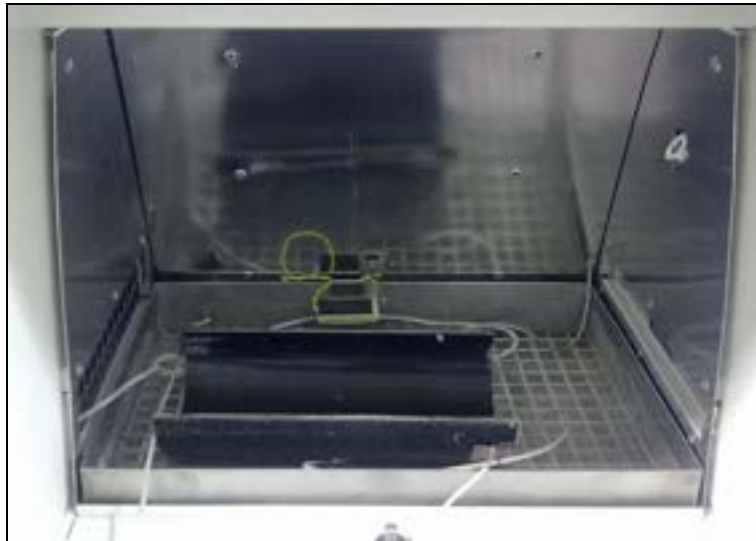


Figura 17 - Particolare del collettore semicilindrico riposto nel vano della Solar box

Infine si è verificata la tecnica di posa della lamina di alluminio riflettente, di cui la foto seguente ne mostra parte del processo.



Figura 18 – Provino con lamina in alluminio riflettente

## 2.4 Realizzazione di un simulatore solare per l'esecuzione di prove indoor

L'attività ha riguardato lo studio, la progettazione e la realizzazione di un simulatore solare per l'esecuzione di prove indoor (in accordo alla normativa tecnica di riferimento EN 12975:2006 – par. 6.1.5) su diverse tipologie di collettori solari, al fine di analizzare e verificare, in condizioni controllate, le loro performance energetiche in vista anche della validazione di modelli ottici e termo-fluidodinamici sviluppati nelle fasi precedenti dell'attività. In particolare l'attività ha riguardato la progettazione e realizzazione del sistema di generazione artificiale della radiazione solare da abbinare al circuito termo-idraulico già in dotazione al laboratorio per le prove indoor su collettori di diverse tipologie.

Scopo di tale sistema è quello di generare in modo artificiale la radiazione solare da proiettare su una superficie disposta parallelamente al campo di lampade che genera il flusso luminoso richiesto e dove verrà posizionato un collettore solare per l'esecuzione di test indoor di efficienza termica.

Il simulatore solare in oggetto è costituito da un insieme di 24 proiettori del tipo PAR 64 da montarsi su una struttura di supporto già in dotazione al Laboratorio, ciascuno equipaggiato con una lampada agli alogenuri metallici della potenza di 1 kW, le cui caratteristiche e la cui disposizione sulla suddetta struttura sono tali da garantire un flusso luminoso che rispetti le specifiche richieste dalla normativa di riferimento sia per quanto riguarda l'uniformità di distribuzione della radiazione solare simulata (classe C secondo IEC 60904-9) sia per quanto riguarda la stabilità temporale (classe B secondo IEC 60904-9).

Di seguito viene riportato lo schema quotato relativo alla griglia metallica su cui sono disposte le singole lampada che formano il sistema di generazione artificiale della radiazione solare.

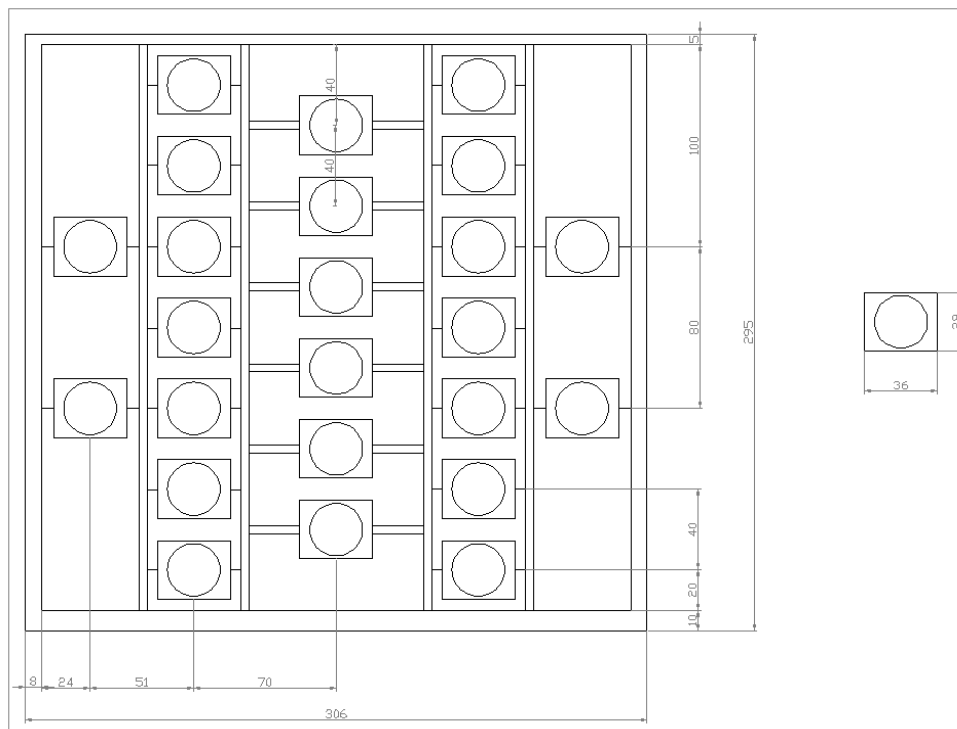


Figura 19 - Schema quotato relativo alla disposizione delle lampade nel simulatore



Nella figura seguente sono riportate le foto relative ai proiettori e alle lampade utilizzate per la realizzazione del simulatore solare. Inoltre è riportata una immagine di dettaglio del sistema di aggancio dei proiettori che consente l'orientazione manuale su due assi di ogni singola lampada. Tale opportunità consente di orientare i singoli fasci luminosi in modo da ottimizzare la distribuzione del flusso radiativo sulla superficie di riferimento.



Figura 20 – Foto dei corpi illuminanti utilizzati per la realizzazione del simulatore solare

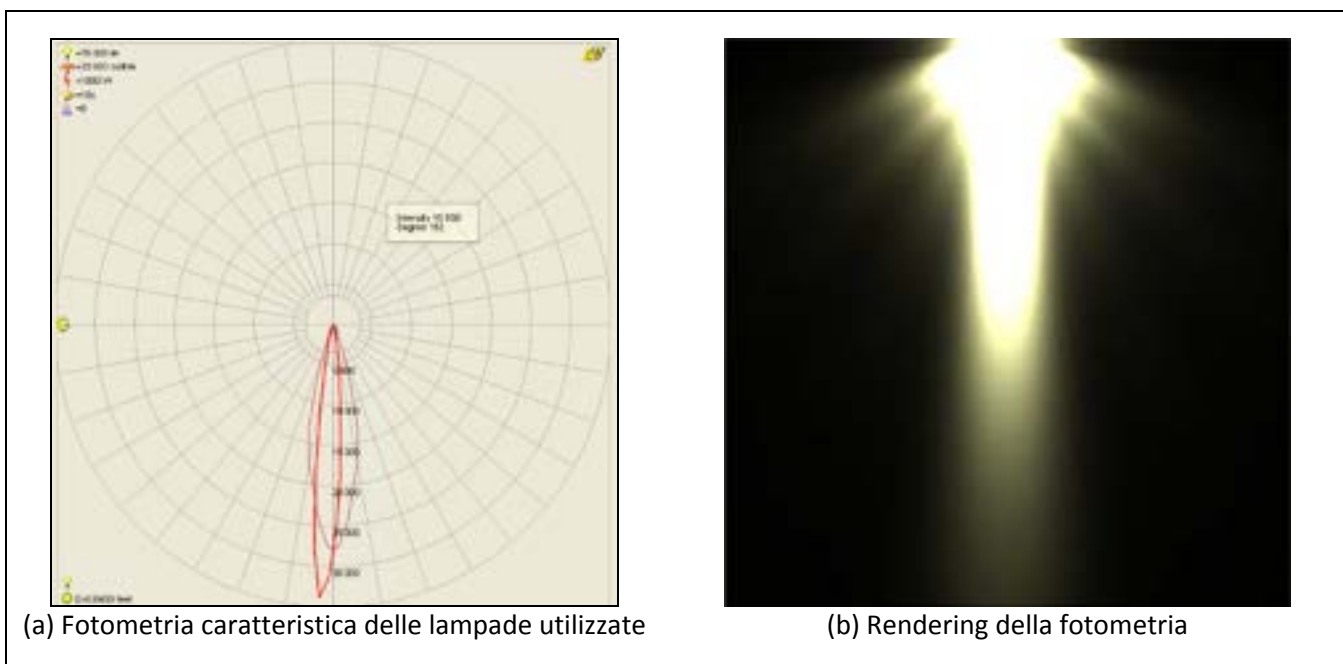


Figura 21 – Fotometria delle lampade utilizzate

Infine, la figura seguente mostra un esempio di analisi illuminotecnica, eseguita con software DIALux, che ha permesso di analizzare la distribuzione del flusso radiativo sulla superficie di riferimento inserendo come dati di input le caratteristiche geometriche e fotometriche delle lampade utilizzate. Ciò ha consentito di verificare la rispondenza del sistema di generazione



artificiale della radiazione solare alle specifiche richieste dalla normativa di riferimento per il testing di collettori solari termici.

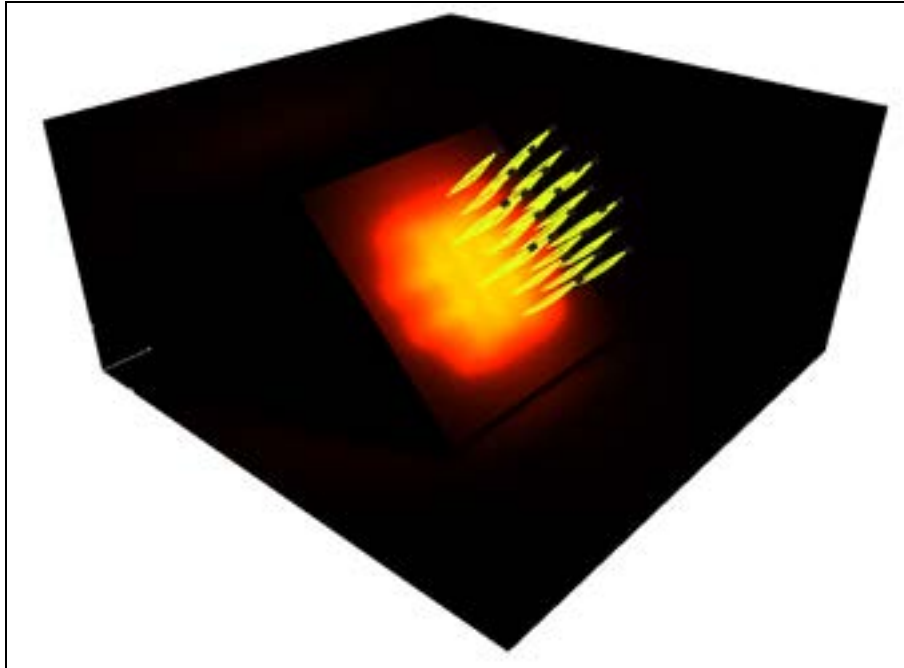


Figura 22 - Esempio di distribuzione del flusso radiativo generato dal campo di lampade del simulatore su una superficie di riferimento

## 2.5 *Sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi solari allo stato pre-industriale o di prototipo per applicazioni a bassa e media temperatura*

L'attività ha come obiettivo la sperimentazione e qualificazione di componenti e sistemi solari in vista della loro utilizzazione sia in ambito residenziale per applicazioni di *solar-cooling* sia in ambito industriale per la produzione di calore di processo. Essa è stata sviluppata utilizzando le *facility*, già implementate nel corso delle annualità precedenti, del laboratorio di prova di collettori e sistemi solari del CR ENEA Trisaia che ha tra le sue finalità, oltre alla certificazione dei prodotti commerciali, anche quella di supportare l'industria nazionale nelle attività di ricerca, sviluppo e sperimentazione di componenti e sistemi innovativi.

In tale contesto, il fine che si intende raggiungere è quello della caratterizzazione energetica e della verifica dell'affidabilità di componenti e sistemi allo stato pre-industriale o di prototipo per applicazioni solari a bassa e media temperatura. In particolare sono stati testati collettori di diversa tipologia quali: collettori a CPC, collettori parabolici lineari, collettori a specchi di Fresnel, sistemi a disco (anche in configurazione ibrida con utilizzo di motori Stirling) e funzionanti indicativamente fino a temperature massime anche di 250 °C. Per la loro caratterizzazione si è ricorso alle metodiche di prova contenute nelle normative europee EN 12975, EN 12976 ed EN 12977, attualmente in fase di sviluppo per le parti riguardanti la qualificazione di collettori a concentrazione. Tali standard europei, una volta emanati, vengono automaticamente recepiti come standard nazionali da parte dell'UNI e pertanto costituiscono la normativa tecnica nazionale di riferimento nel settore del solare termico anche ai fini dell'accesso alle diverse forme di incentivazione attualmente presenti a livello nazionale.

In questo contesto, nel corso della presente annualità dell'accordo di programma, sono state condotte attività di supporto tecnico-scientifico a piccole e medie imprese nazionali operanti nel settore delle applicazioni a media temperatura. Attraverso l'attività di *testing* sono state infatti analizzate alcune tematiche peculiari dei sistemi a concentrazione che hanno consentito sia di evidenziare alcune anomalie funzionali sia di fornire informazioni utili al miglioramento dei prodotti immessi sul mercato.

In particolare, le attività hanno riguardato:

- l'analisi delle problematiche inerenti la caratterizzazione energetica di concentratori dotati di sistema ad inseguimento, quali collettori parabolici lineari e collettori a specchi lineari di Fresnel, in relazione alla dipendenza dell'efficienza termica dall'angolo con cui la radiazione solare diretta (DNI – *Direct Normal Irradiance*) incide sulla superficie di apertura (analisi dell'IAM – *Incidence angle modifier*).
- la sperimentazione di sistemi ibridi costituiti da un concentratore parabolico puntuale, del tipo Dish/Stirling, funzionante in assetto cogenerativo in grado quindi di produrre sia energia elettrica immessa direttamente in rete sia di produrre energia termica, recuperando il calore di scarto derivante dal circuito di raffreddamento del motore Stirling.

### 2.5.1 Analisi dell'IAM in concentratori dotati di sistema di inseguimento

Relativamente alla prima tematica, sono state condotte prove sperimentali, sia su concentratori parabolici lineari sia su concentratori a specchi lineari di Fresnel, in condizioni di incidenza non normale della DNI. Contestualmente sono state effettuate delle analisi teoriche con lo scopo di prevedere l'andamento dell'IAM in funzione dei diversi angoli di incidenza, tenendo conto delle caratteristiche ottiche e geometriche dei collettori considerati. I risultati di tali analisi sono stati confrontati con i dati sperimentali ottenuti.

#### 2.5.1.1 Modificatore dell'angolo di incidenza (IAM) per sistemi a concentrazione

Il modificatore dell'angolo di incidenza (IAM) è un fattore correttivo da applicare all'efficienza ottica per tener conto dell'influenza dell'angolo di incidenza della radiazione solare sulle performance energetiche del collettore.

In generale l'efficienza ottica per un collettore a concentrazione è data dalla seguente espressione:

$$\eta_{opt} = \rho(\tau\alpha)_{eff} \gamma_{\theta} (1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta)$$

dove:

- $\rho$  riflettanza media della superficie riflettente
- $(\tau\alpha)_{eff}$  prodotto trasmittanza-assorbanza effettiva del ricevitore
- $\theta$  angolo di incidenza che i raggi solari formano rispetto alla normale al piano di apertura
- $\gamma_{\theta}$  fattore di intercettazione all'angolo  $\theta$ , definito come la frazione di raggi incidenti sulla superficie di apertura che raggiungono il ricevitore
- $A_f$  fattore correttivo che tiene conto delle caratteristiche geometriche del concentratore

Ci sono diversi fattori che influenzano il valore dell'efficienza ottica al variare dell'angolo di incidenza  $\theta$ . Tali fattori includono: la dipendenza angolare sia del prodotto trasmittanza-assorbanza del ricevitore che del fattore di intercettazione che diminuiscono all'aumentare dell'angolo con cui la radiazione solare diretta incide sulla superficie di apertura del concentratore; la geometria del collettore; le varie imperfezioni che caratterizzano un concentratore reale rispetto al caso ideale.

L'insieme di tali fattori contribuisce alla definizione del modificatore dell'angolo di incidenza la cui espressione è in generale data dalla seguente relazione:

$$\eta_{opt} = K(\theta) [\rho(\tau\alpha)_n \gamma_0]$$

dove:

- $(\tau\alpha)_n$  prodotto trasmittanza-assorbanza per incidenza normale
- $\gamma_0$  fattore di intercettazione per incidenza normale

### 2.5.1.2 Effetti geometrici che influenzano il comportamento termico di un concentratore parabolico lineare

Oltre agli effetti prettamente ottici descritti nel paragrafo precedente, un contributo non trascurabile al modificatore dell'angolo di incidenza è dato dagli "effetti di bordo" (*end loss*) causati dalla non totale illuminazione del ricevitore durante l'operatività ad angoli di incidenza della radiazione solare diretta non ortogonali all'area di apertura.

La figura seguente evidenzia graficamente tale effetto che può incidere significativamente sulle performance energetiche di un concentratore parabolico lineare, soprattutto nel caso di collettori di lunghezza piccola rispetto alla corda della parabola.

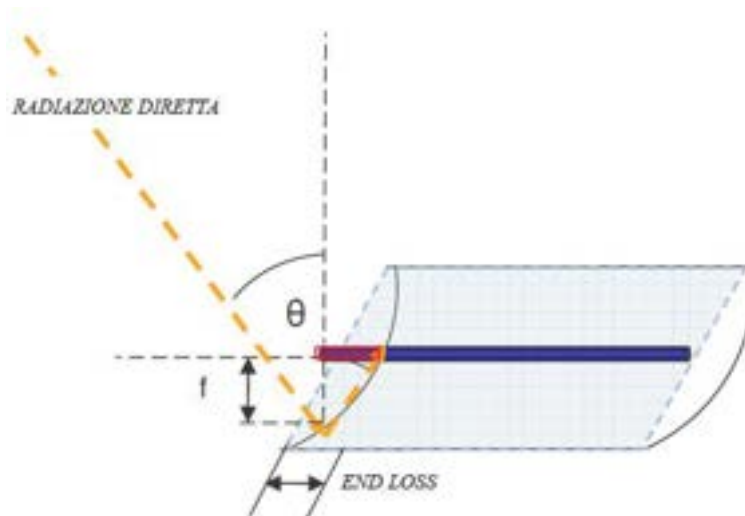


Figura 23 – Rappresentazione grafica degli effetti di bordo in un PTC

Ne consegue che un'espressione generale per il modificatore dell'angolo di incidenza per un concentratore parabolico lineare (PTC) con inseguimento a singolo asse è data dalla seguente relazione:

$$K(\theta) = K_0(\theta) \Gamma(\theta) \cos(\theta)$$

dove i singoli termini rappresentano rispettivamente:

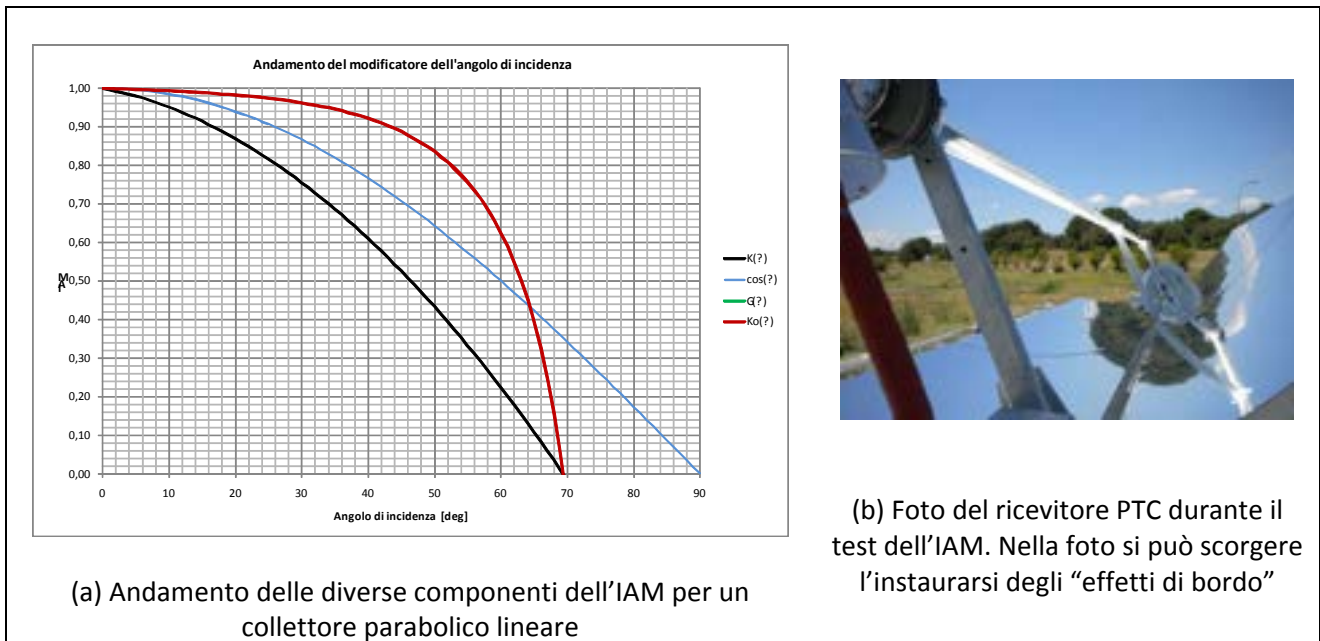
- $K_0(\theta)$  le perdite dovute alle proprietà ottiche dei materiali che costituiscono il concentratore e che sono indipendenti dalla lunghezza dello stesso
- $\Gamma(\theta)$  un fattore geometrico correttivo che tiene in conto degli "effetti di bordo" dovuti alla non totale illuminazione del ricevitore ad angoli di incidenza diversi da zero
- $\cos(\theta)$  un fattore geometrico che tiene in considerazione gli effetti della riduzione di area di apertura intercettata dalla radiazione solare diretta (DNI)

La tabella seguente riporta i dati sperimentali ottenuti nelle misure di IAM effettuate a diversi angoli di incidenza della radiazione solare diretta.

**Tabella 1 – Dati relativi al modificatore dell’angolo di incidenza (IAM)**

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
<b>K(θ)</b>	1.000	0.950	0.868	0.755	0.610	0.433	0.225	-	-	-
<b>cos(θ)</b>	1.000	0.985	0.940	0.866	0.766	0.643	0.500	0.342	0.174	0.000
<b>Γ(θ)</b>	1.000	0.971	0.941	0.906	0.864	0.807	0.719	0.554	0.079	-
<b>K<sub>0</sub>(θ)</b>	1.000	0.993	0.982	0.962	0.921	0.835	0.625	-	-	-

Il grafico seguente riporta gli andamenti dei diversi fattori che compongono l’IAM in funzione dell’angolo di incidenza.



**Figura 24 – Modificatore dell’angolo di incidenza di un PTC (Soltigua)**

Per il calcolo del fattore geometrico correttivo  $\Gamma(\theta)$  si è utilizzata la seguente relazione:

$$\Gamma(\theta) = 1 - \frac{f}{l} \left( 1 + \frac{a^2}{48f^2} \right) \tan(\theta)$$

dove  $f$  è la distanza focale,  $a$  l’apertura della parabola ed  $l$  è la lunghezza del concentratore cilindro-parabolico.

### 2.5.1.3 Effetti geometrici che influenzano il comportamento termico di un concentratore a specchi lineari di Fresnel

In generale per un sistema a concentrazione si definisce **angolo di incidenza trasversale**  $\theta_T$  (calcolato rispetto alla normale al piano orizzontale) l'angolo formato dalla proiezione del Sole nel piano trasversale al tubo ricevitore e l'asse verticale del concentratore.

Per un collettore cilindro-parabolico con tracking ideale, l'efficienza ottica è del tutto indipendente da questo angolo (che corrisponde all'angolo di tracking), a meno di effetti di ombreggiamento dovuti alla presenza di più collettori disposti su file adiacenti. Nel caso di un collettore a specchi lineari di Fresnel, poiché l'orientazione degli specchi cambia a seconda dell'angolo di incidenza trasversale, l'efficienza si riduce all'aumentare dell'angolo di incidenza. Ciò è dovuto sia all'aumento dell'angolo di incidenza medio sugli specchi sia agli effetti della riduzione di area di apertura intercettata dalla radiazione solare diretta (DNI) oltreché ad effetti di ombreggiamento (*shadowing*) ed intercettazione della radiazione riflessa (*blocking*) tra specchi adiacenti.

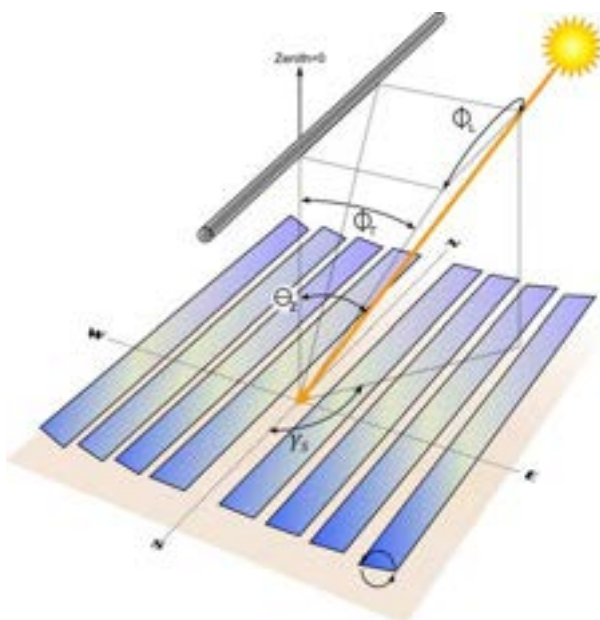


Figura 25 – Definizione degli angoli utilizzati nei calcoli ottici di concentratori a specchi di Fresnel

Analogamente si definisce **angolo di incidenza longitudinale**  $\theta_L$  l'angolo formato dalla proiezione del Sole nel piano verticale disposto longitudinalmente rispetto al tubo ricevitore e l'asse verticale del concentratore.

Nel caso di un collettore cilindro-parabolico senza errori di tracking,  $\theta_L$  è semplicemente l'angolo con cui incide la radiazione solare diretta (DNI) sull'apertura del collettore. Nel caso invece di un collettore di Fresnel, non potendosi definire rigorosamente un piano di apertura del collettore, l'angolo  $\theta_L$  ha un significato meno esplicito. Ad ogni modo, la dipendenza dell'efficienza ottica da questo angolo è con buona approssimazione (a meno di "effetti di bordo" dovuti alla lunghezza finita del tubo ricevitore che, ad angoli diversi da zero, determinano una non completa illuminazione del tubo ricevitore) proporzionale a  $\cos(\theta_L)$  in entrambe le tipologie di concentratori.

Dai rapporti tra i valori di efficienza ottica ottenuti a diversi angoli di incidenza trasversale/longitudinale e l'efficienza ottica per incidenza normale, si ottengono dei fattori geometrici che tengono in conto degli effetti sopra citati.

Il grafico seguente mostra gli andamenti stimati di tali fattori geometrici (trasversale e longitudinale), ottenuti a seguito di simulazioni numeriche applicate al collettore della DWA.

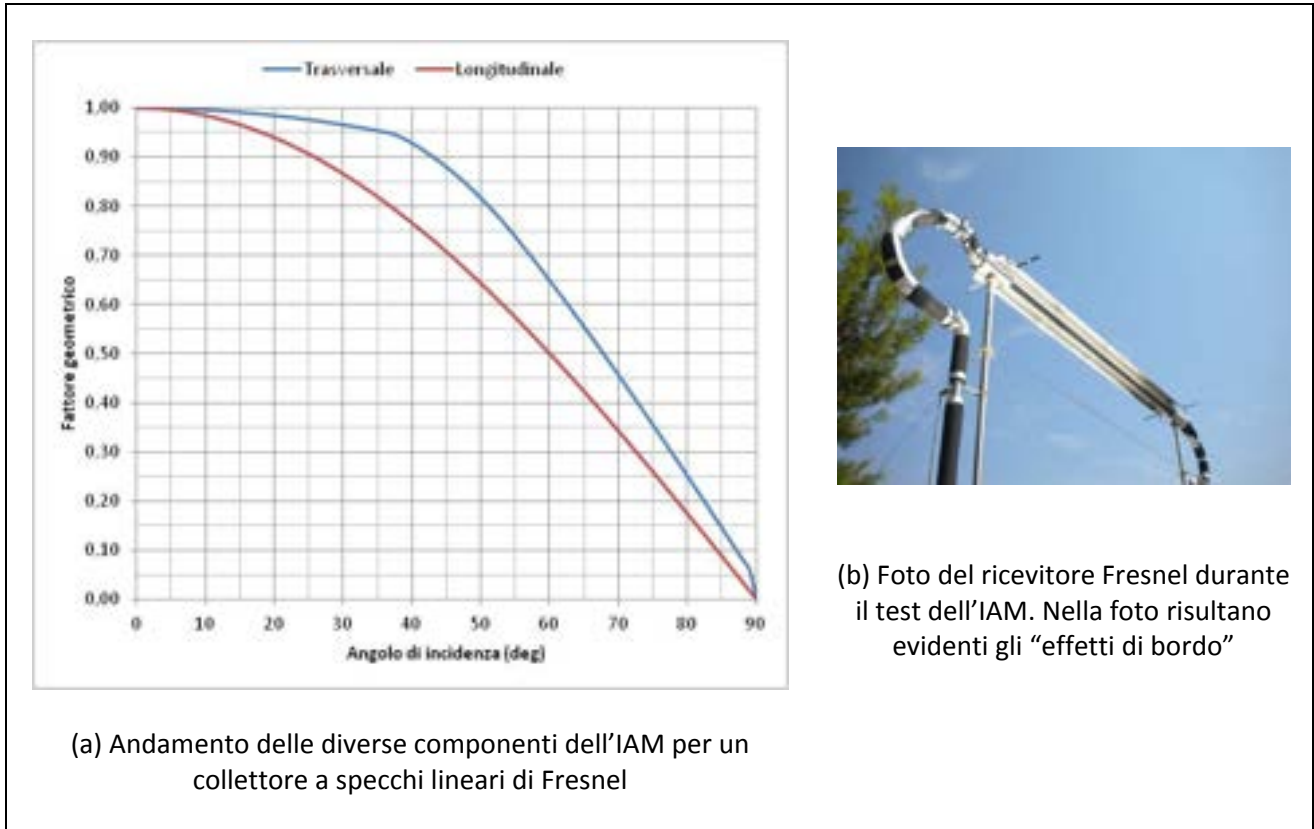


Figura 26 - Stima degli andamenti dei fattori geometrici trasversale e longitudinale nel collettore a specchi di Fresnel (DWA)

Gli andamenti dei due diversi fattori geometrici ottenuti dall'analisi precedente, incidono sul comportamento termico del collettore in misura differente a seconda che il concentratore sia orientato in direzione E-W o N-S.

In particolare nella configurazione con **tracking su asse N-S**, le misure di efficienza termica effettuate in corrispondenza del mezzogiorno solare non sono affette dal fattore geometrico trasversale, bensì solo da quello longitudinale che riduce l'efficienza ottica di un fattore proporzionale al  $\cos(\theta_L)$  dove:

$$\theta_L = \frac{\pi}{2} - \alpha = \phi - \delta$$

dove:

- $\alpha$  angolo di zenith (altezza del Sole all'orizzonte) al mezzogiorno locale
- $\phi$  latitudine del luogo

$\delta$  declinazione solare dipendente dal giorno dell'anno in cui si effettua la misura

Inoltre a tale effetto geometrico di riduzione dell'efficienza ottica si aggiunge anche l'effetto di bordo dovuto alla parziale illuminazione del tubo ricevitore.

Nella configurazione con **tracking su asse E-W**, invece, in corrispondenza del mezzogiorno solare l'angolo di incidenza longitudinale è nullo, e quindi il tubo risulta completamente illuminato dalla radiazione concentrata. Di contro l'angolo di incidenza trasversale sarà, analogamente a prima, pari a:

$$\theta_T = \frac{\pi}{2} - \alpha = \phi - \delta$$

dove i simboli hanno lo stesso significato del caso N-S.

In entrambe le situazioni abbiamo quindi una dipendenza del comportamento termico del collettore al mezzogiorno solare che può cambiare a seconda del giorno dell'anno in cui si effettua il test.

Con riferimento al test-site di Trisaia ( $\phi = 40.15^\circ \text{N}$ ) dove sono state effettuate le misure sul componente della DWA, l'angolo  $\theta$  (trasversale o longitudinale che sia) al mezzogiorno solare varia nel corso dell'anno da un minimo di circa  $17^\circ$  (solstizio estivo) ad un massimo di circa  $64^\circ$  (solstizio invernale). Ciò ha comportato variazioni significative dell'efficienza ottica, con riduzioni anche dell'ordine del 50%.

### 2.5.2 Sperimentazione su sistemi ibridi del tipo Dish/Stirling

Relativamente alla seconda tematica, è stato approntato il set-up sperimentale per l'esecuzione di test su un concentratore parabolico puntuale dotato di motore Stirling e sono state avviate le relative prove con lo scopo di analizzare le performance energetiche del sistema e valutare la frazione di energia termica prodotta rispetto alla produzione energetica totale.

Il sistema ibrido in oggetto funziona in assetto cogenerativo, generando contemporaneamente 1 kW di energia elettrica a 230 Vac - 50Hz e 3 kW di energia termica da destinarsi alla produzione di acqua calda ad uso sanitario e riscaldamento degli ambienti.

Il sistema utilizza un motore Stirling del tipo "free piston" di piccola taglia per la cogenerazione di energia elettrica e termica da fonte solare. Il motore è prodotto da Microgen Engine Corporation e funziona a ciclo chiuso utilizzando un gas come fluido termodinamico (solitamente aria, azoto oppure elio o idrogeno nelle versioni ad alto rendimento).

La differenza di temperatura, che si realizza tra la testa del motore Stirling e la zona raffreddata da un flusso d'acqua a portata controllata (circa 800 litri/h), innesca una pulsazione ciclica, ovvero un moto alternato del pistone del motore, che perdura fin quando si continua a fornire calore, producendo energia elettrica e termica. La figura seguente illustra le varie fasi del processo.



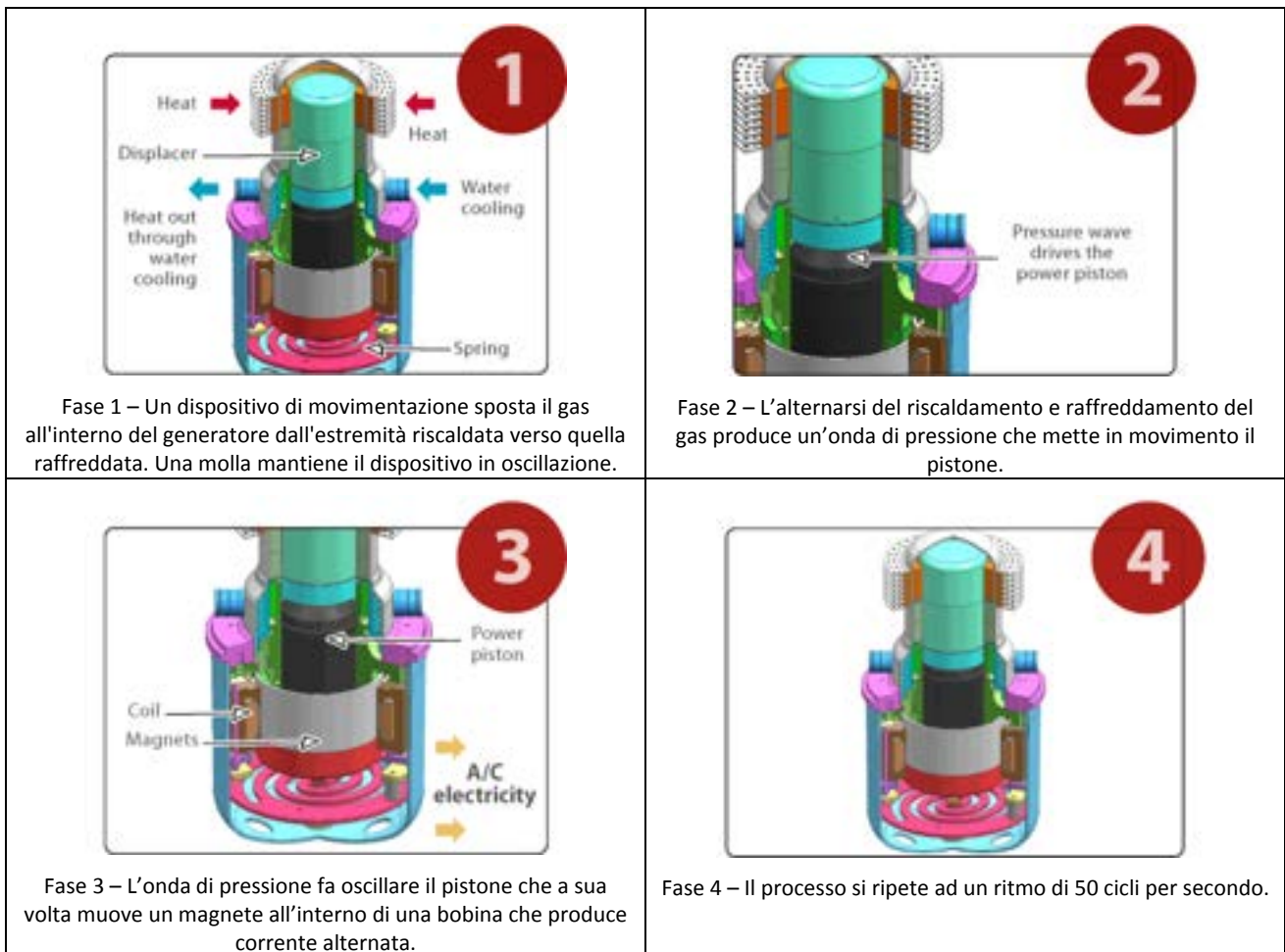


Figura 27 – Fasi di funzionamento del motore Stirling “free piston” della Microgen (immagini tratte dal sito web del produttore)

In un sistema solare del tipo Dish/Stirling la fonte di calore che alimenta il ciclo termodinamico è la radiazione solare concentrata dal sistema ottico costituito da un disco parabolico, nel cui fuoco è posizionato il motore Stirling.

Le foto seguenti mostrano il sistema in funzione durante la campagna sperimentale.



Figura 28 - Foto del set-up sperimentale del sistema Dish/Stirling (Innova Solar Energy)

I grafici seguenti illustrano, rispettivamente, gli andamenti della potenza elettrica e termica prodotta dal sistema durante una giornata di test caratterizzata da condizioni meteo-climatiche stabili, con livelli di DNI (*Direct Normal Irradiance*) che hanno raggiunto un valore di picco dell'ordine di 850 W/m<sup>2</sup>.

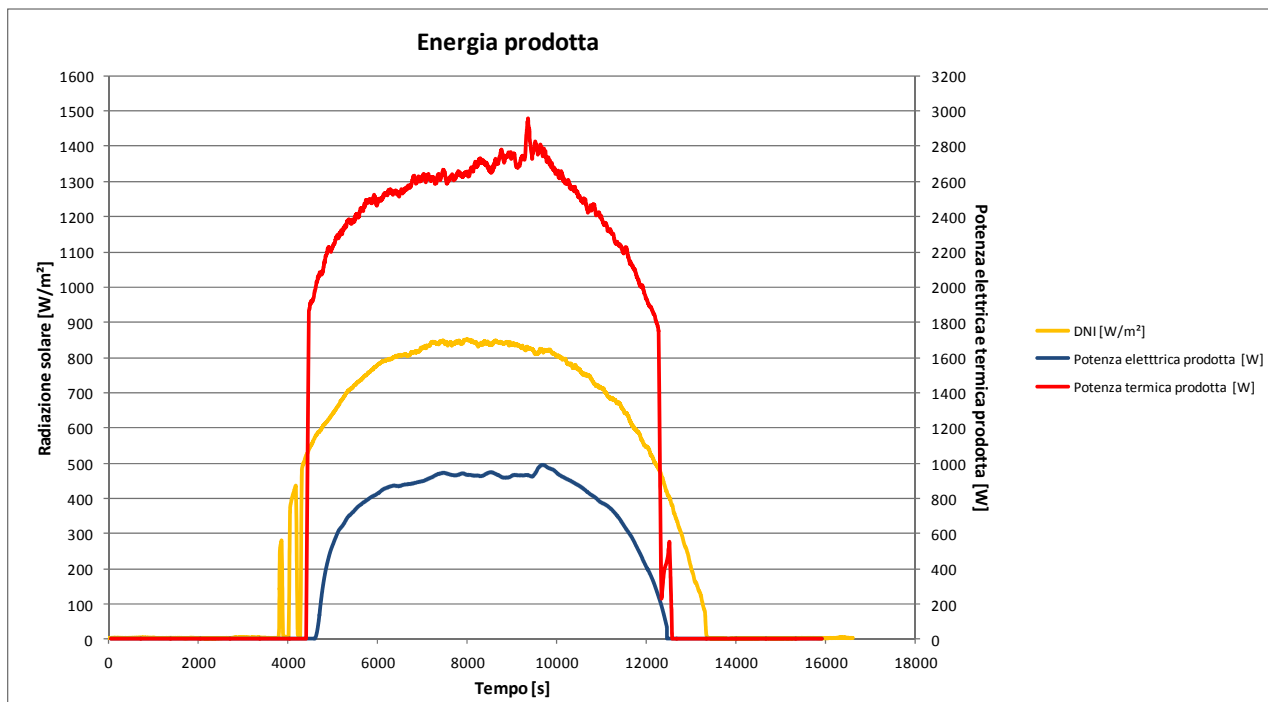


Figura 29 –Potenza elettrica e termica prodotta in una giornata tipo

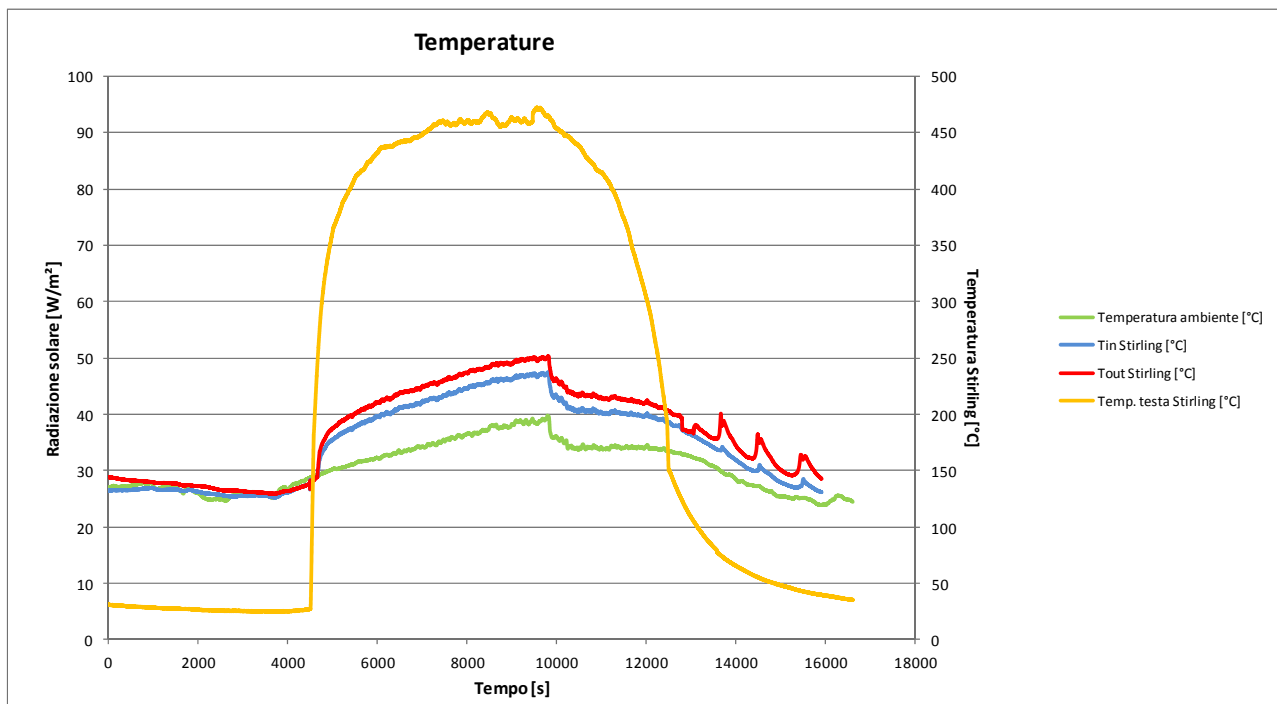


Figura 30 –Temperature caratteristiche del ciclo

Dal grafico di Figura 29 si evince che le potenze, termiche ed elettriche, di picco ottenute sono confrontabili con i valori nominali caratteristici del sistema ( $1 \text{ kW}_e$  e  $3 \text{ kW}_{th}$ ).

### 3 Conclusioni

Sulla base degli obiettivi realizzativi previsti dalla presente *linea di attività B: Caratterizzazione di componenti solari per applicazioni di solar cooling*, sono state portate a termine le diverse attività previste per l'annualità in corso.

In particolare:

- È stato sviluppato un prototipo di concentratore solare compatto, basato su ottiche del tipo CPC (Compound Parabolic Concentrator) che focalizzano la radiazione solare su un ricevitore a geometria piana, per la cui analisi e progettazione sono stati implementati specifici modelli matematici, sia di tipo numerico che agli elementi finiti, al fine di individuare una configurazione ottimizzata dal punto di vista ottico e termo-fluidodinamico. Successivamente si è proceduto alla prototipizzazione del dispositivo, utilizzando materiali e tecniche costruttive di tipo innovativo.
- Si è proceduto alla progettazione e realizzazione di un simulatore solare, ed in particolare del sistema di generazione artificiale della radiazione solare, le cui caratteristiche costruttive e funzionali sono conformi ai requisiti richiesti dalla normativa tecnica per l'esecuzione di test indoor di collettori solari termici (EN 12975-2).
- Infine, nell'ambito delle attività di qualificazione di componenti e sistemi a bassa e media temperatura per applicazioni di solar cooling, presso il Laboratorio solare del CR ENEA Trisaia si sono condotte diverse sperimentazioni su componenti a concentrazione di varia

tipologia (CPC, PTC, Fresnel) e su sistemi ibridi cogenerativi (sistemi Dish/Stirling), ottenendo risultati utili per la loro caratterizzazione e successivo sviluppo.

## Riferimenti bibliografici

- [1] DUFFIE J. A., BECKMAN W. A. (2006): Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition, John Wiley and Sons
- [2] GOSWAMI D. Y., KREITH F., KREIDER J. F. (1999): Principles of Solar Engineering, 2nd edition, Taylor & Francis, 1999
- [3] CUCUMO M.A., MARINELLI V., OLIVETI G., (1994): Ingegneria solare principi ed applicazioni. Pitagora Editrice
- [4] RABL A. (1976): Optical and Thermal Properties of Compound Parabolic Concentrators, Solar Energy, 18, 497
- [5] RABL A. (1985): Active Solar Collectors and their Applications. Oxford University Press, New York and Oxford
- [6] HABIB G., LAVRA M. (2011): Tecnologie solari a concentrazione. Produzione di calore a media temperatura, ISES Italia, Report AdP ENEA-MiSE