POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Studio per l'invecchiamento accelerato di una cella fotovoltaica tramite un concentratore solare

Relatori

prof. Eliodoro Chiavazzo

dott. Matteo Morciano

dott. Matteo Fasano

Candidato

Maurizio Mosso

Luglio 2018

A nonna Lucia.

Indice

Abstract 5

1. Stato dell'arte 7

1.1 Celle fotovoltaiche in Perovskite 7

1.1.1 Composizione e funzionamento 8

1.1.2 Criticità e test di invecchiamento 9

1.2 Solare a concentrazione: tecnologie 11

1.3 Analisi geometrica e strutturale di un Collettore a Disco Parabolico 17

2. Analisi ottica del dispositivo 22

2.1 Basi teoriche di Comsol e impostazione dei parametri 23

2.2 Individuazione del parametro di deviazione dei raggi riflessi (Sda) 26

2.3 Variazione della posizione del ricevitore e correzione degli errori 30

2.4 Risultati dell'analisi ottica 33

3. Modellazione del sensore per la verifica dell'irraggiamento 37

3.1 Sensore I di irraggiamento solare concentrato 37

3.2 Sensore II di irraggiamento solare concentrato 42

3.3 Sensore III di irraggiamento solare concentrato 45

3.4 Selezione del sensore per la misura dell'irraggiamento 46

3.5 Modellazione della struttura di sostegno 49

4. Analisi termica del dispositivo 52

4.1 Dissipazione del calore a fluido 54

4.2 Dissipazione del calore per convezione forzata 55

4.3 Dissipazione passiva del calore 56

4.4 Modellazione dell'insieme 60

4.5 Impostazione della simulazione termica tramite Comsol 62

4.6. Risultati dell'analisi termica 63

5. Prove sperimentali 66

5.1 Verifica della radiazione totale assorbita dalle celle 66

5.2 Monitoraggio delle temperature 69

5.3 Verifica sperimentale della temperatura 70

5.4 Bilancio termico per il calcolo della temperatura di modello 73

5.5 Risultati delle prove sperimentali 77

5.6 Rilevanza del dissipatore per la resistenza termica del sistema 84

5.7 Risultati principali e limitazioni 87

Conclusioni 88

Bibliografia e sitografia 90

Ringraziamenti 92

Abstract

L'obiettivo del lavoro presente consiste nell'elaborare una configurazione idonea per lo studio di invecchiamento delle celle fotovoltaiche a Perovskite, per testare la resistenza di un particolare rivestimento composto da un polimero fluorato. I test di invecchiamento standard prevedono di sottoporre le celle solari a radiazioni concentrate per simulare l'esposizione alla radiazione solare, tramite appositi macchinari di laboratorio. Questi test tuttavia non rispecchiano le reali condizioni di lavoro delle celle solari in ambiente esterno, durante i quali le celle sono sottoposte a frequenti sbalzi termici e a condizioni di umidità variabile. D'altro canto, i test di invecchiamento che prevedono di installare le celle in ambiente esterno, richiedono tempi prolungati.

Per far fronte a questi inconvenienti, si è pensato di utilizzare per i test di invecchiamento il concentratore solare a specchio parabolico, già installato al Politecnico di Torino per la produzione di acqua calda sanitaria. L'idea è quella di sfruttare l'irraggiamento concentrato prodotto per uno studio di invecchiamento in tempi più brevi, mantenendo le condizioni proprie dell'ambiente esterno. Tuttavia, l'alto valore di irraggiamento a cui vengono sottoposte le celle solari, richiede un sistema di raffreddamento adeguato per fare in modo che non venga superata la temperatura limite di 70 °C, oltre la quale le celle solari subirebbero una degradazione termica irreversibile.

In questa tesi il primo capitolo introduce lo stato dell'arte relativo alle celle solari a Perovskite e alla tecnologia dei concentratori solari. Il secondo capitolo definisce le caratteristiche ottiche del concentratore solare del Politecnico di Torino, per una corretta valutazione del valore di irraggiamento concentrato incidente sulle celle solari durante il test. Il terzo capitolo propone alcune configurazioni per la progettazione di un sensore per la misura dell'irraggiamento, a verifica dei risultati ottenuti nel capitolo precedente. Nel quarto capitolo viene descritta la progettazione di un sistema di raffreddamento adeguato delle celle solari, congiuntamente ad una simulazione termica per la valutazione della temperatura massima raggiunta. Infine, nel qiuinto capitolo sono mostrati i risultati delle prove sperimentali eseguite sul concentratore solare, per la verifica del modello matematico adottato per la dissipazione del calore.

In attesa di verificare la correttezza dei parametri sperimentali adottati, tramite l'utilizzo di una strumentazione idonea (non ancora disponibile al momento della pubblicazione del lavoro presente), i risultati raggiunti tramite le prove sperimentali sono incoraggianti. Risulta infatti adeguato il sistema di raffreddamento adottato, che consiste in un semplice dissipatore alettato operante in condizioni di convezione naturale. Questa configurazione di dissipazione del calore,

totalmente passiva, permette una maggiore sicurezza affidabilità del sistema, in quanto il funzionamento non dipende da malfunzionamenti di componenti meccaniche o elettriche, i quali sarebbero inevitabilmente esposti alle condizioni dell'ambiente esterno.

1. Stato dell'arte

1.1 Celle fotovoltaiche in Perovskite

Attualmente il mercato del solare fotovoltaico è dominato dalle celle al silicio. La loro diffusione è principalmente dovuta alla disponibilità della materia prima (silicio) e l'alta efficienza elettrica raggiunta (15 -25%). Per la fabbricazione tuttavia sono richieste alte temperature (circa 1000 °C), di conseguenza risulta molto energivora e costosa. Inoltre, nei processi di produzione vengono utilizzati acidi molto tossici e difficili da smaltire. Infine, le celle al silicio non sono particolarmente adatte al fotovoltaico integrato nelle vetrate e nelle coperture degli edifici, in quanto richiedono spessori significativi e l'efficienza è sensibilmente ridotta, per la scarsa capacità di captare la luce diffusa. Le celle solari a Perovskite sono una valida alternativa al silicio, dal momento che promettono di risolvere questi problemi, come verrà analizzato in seguito.

Il nome Perovskite è stato dato in onore del mineralogista russo Lev Perovskij ad un cristallo di forma cubica e di composizione ABX_3, dove X è in genere un alogeno o ossigeno atomico.

L'introduzione delle Dye-Sensitized Solar Cell, dette anche Celle di Grätzel (di cui fanno parte le celle in Perovskite), permisero la costruzione di celle solari formate da un singolo strato di materiale fotosensibile, che trasmette gli elettroni a due elettrodi contigui. Nel 2009 per la prima volta Kojima et al., utilizzarono una particolare forma di Perovskite organica-inorganica al piombo ($CH_3NH_3PbX_3$, dove X è un atomo di alogenuro (I, Cl, o Br)) come materiale fotosensibile per queste celle, raggiungendo un'efficienza di conversione della radiazione solare del 2-3%[1]. Nel 2011 Park incrementò l'assorbimento migliorando il rivestimento della cella, ottenendo in questo modo un'efficienza del 6,5%. Tuttavia, la cella era ancora molto instabile a causa della presenza di un elettrolita in forma liquida, che dissolveva la Perovskite e ne peggiorava significativamente le prestazioni. Questo problema fu risolto sostituendo l'elettrolita con uno strato di biossido di titanio TiO_2, superando nel 2013 il 15% di efficienza[2].

Il vantaggio di queste celle consiste nella facilità di produzione: la Perovskite è ottenuta da una semplice e relativamente economica reazione chimica e richiede temperature di lavorazione non superiori ai 150 °C. Inoltre, grazie all'elevato coefficiente di assorbimento della Perovskite, lo

[1]MICHAEL GRATZEL, NAM-GYU PARK, Organometal Halide Perovskite Photovoltaics: a diamond in the rough, World Scientific Publishing Company, 2014
[2] Ivi.

strato attivo è molto sottile (inferiore al micrometro), pertanto si adatta molto bene all'applicazione del fotovoltaico integrato.

1.1.1 Composizione e funzionamento

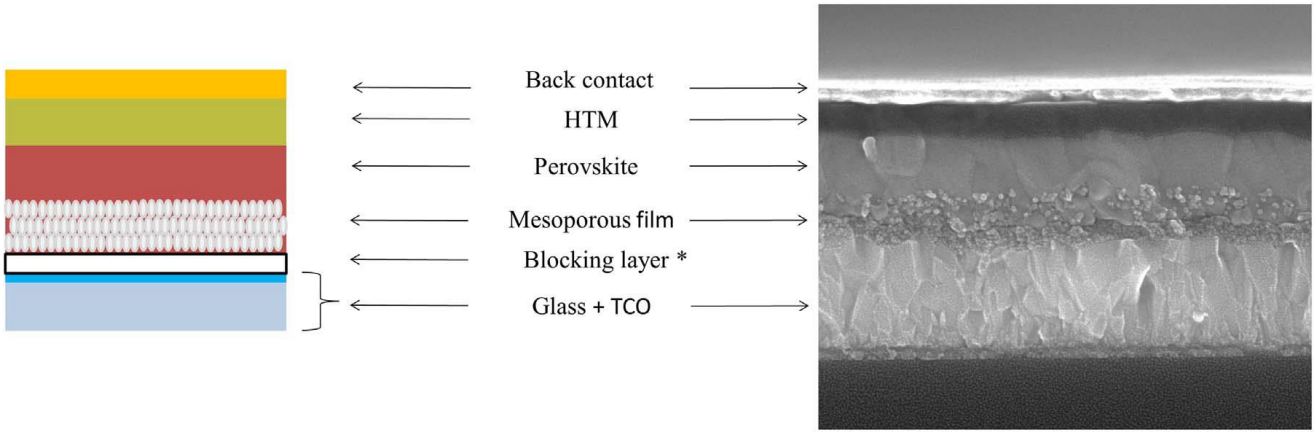


Figura 1.1 *Struttura a multistrato di una cella a Perovskite ed immagine al microscopio elettronico. Figura ri-adattata dalla referenza* [3]

La struttura di una cella solare a Perovskite è composta da sei strati (fig. 1.1):

1) Il primo strato, a contatto diretto con la radiazione solare, è il Transparent conductive oxide (TCO) glass substrate, che permette il passaggio della luce e il trasporto degli elettroni.
2) Il bloking layer, solitamente formato da TiO_2, crea una giunzione di tipo n selettiva verso gli elettroni. Gli elettroni che giungono dallo strato di Perovskite vengono convogliati nel primo strato e sono immessi nel circuito esterno, creando una differenza di potenziale.
3) Un film mesoporoso, la cui principale funzione è di fornire un substrato su cui depositare la Perovskite.
4) Lo strato di Perovskite assorbe la radiazione solare attivando la separazione delle cariche. Incanala quindi gli elettroni verso lo strato superiore (giunzione n), e le vacanze nello strato inferiore (giunzione p). (Fig. 1.2)
5) Uno strato conduttivo per le vacanze detto Hole Transfer Material (HTM).
6) Un ultimo strato metallico conduttivo, che riceve gli elettroni dal circuito esterno e li reimmette nella cella, completando il circuito.[4]

[3] Isabel Mesquita, Luísa Andrade, Adélio Mendes, Perovskite solar cells: Materials, configurations and stability, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
[4] Ivi.

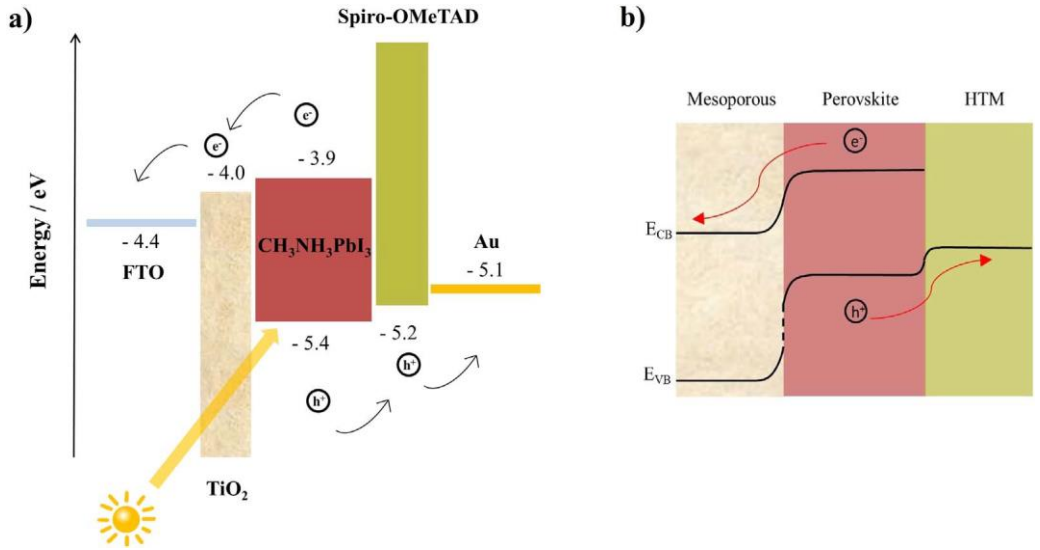


Figura 1.2 *a) Energia di livello nei differenti strati. b)Separazione delle cariche. Figura ri-adattata dalla referenza* [5]

1.1.2 Criticità e test di invecchiamento

Le celle solari a Perovskite sono particolarmente sensibili all'umidità e alle radiazioni ultraviolette, che ne degradano la struttura interna comportando una riduzione di efficienza in tempi molto brevi.
Per ovviare a questo problema sono state proposte diverse soluzioni, come incapsulare la cella in uno strato di materiale polimerico impermeabile, o sostituire le molecole organiche presenti con ossidi metallici. Tuttavia, queste soluzioni sono in grado di fornire una protezione soltanto per l'umidità, fornendo una soluzione parziale o insufficiente per i danni provocati dalle radiazioni UV e dalle alte temperature.
Una soluzione a questo problema l'ha trovata un gruppo del Politecnico di Torino, in collaborazione con il Politecnico di Losanna. È stato messo a punto un particolare rivestimento composto da un polimero fluorato, che ha il doppio vantaggio di proteggere la cella dalle radiazioni UV, e impermeabilizzarla rendendola resistente all'umidità atmosferica.
Uno strato di questo polimero viene fotopolimerizzato sulla superficie superiore della cella. Le radiazioni UV incidenti sullo strato vengono bloccate e riemesse nello spettro della luce visibile (Fig. 1.3). In questo modo viene anche incrementata l'efficienza di 5-6 punti percentuali, raggiungendo un'efficienza complessiva del 19%.

[5] Isabel Mesquita, Luísa Andrade, Adélio Mendes, op. cit.

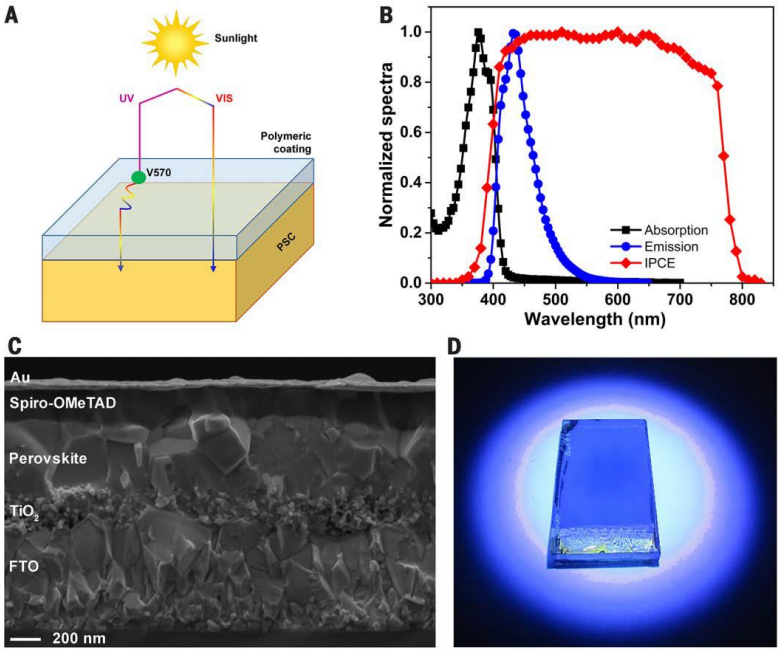


Figura 1.3 *A) Schema del rivestimento, B) Spettro di assorbimento ed emissione, C) Struttura della cella, D) Fotografia di una cella esposta ai raggi UV. Figura ri-adattata dalla referenza* [6]

Per testare la resistenza di questo rivestimento sono state effettuate delle prove in diverse condizioni di stress. Il primo test prevedeva di inserire le celle in una camera riempita di gas argon in assenza di umidità, e di sottoporle per tre mesi consecutivi ad una radiazione complessiva di 5 mW/cm^2, con un 5% di radiazione con lunghezza d'onda compresa tra i 280 e i 400 nm per simulare le radiazioni solari ultraviolette. Nei successivi tre mesi le celle venivano sottoposte ad un'atmosfera con umidità controllata pari al 50%. Come si può notare dalla figura riportante i risultati del test (fig. 1.4A), le celle con lo strato fluorato sono risultate molto più resistenti alle radiazioni ultraviolette. Tuttavia, il solo rivestimento nella parte superiore non è sufficiente a proteggere le celle dall'umidità, pertanto una parte delle celle sono state ricoperte anche nella parte inferiore da uno strato polimerico fortemente idrofobico. Queste ultime hanno mantenuto un buon livello di efficienza per tutta la durata del test.

Nel secondo test le celle sono state esposte all'ambiente esterno per tre mesi, sottoposte alle intemperie e a sbalzi di temperatura. Anche in queste condizioni hanno dimostrato un buon comportamento, perdendo soltanto il 5% di efficienza al termine del test (fig. 1.4C)[7].

[6] Federico Bella, Gianmarco Griffini, Juan-Pablo Correa-Baena, Guido Saracco, Michael Grätzel, Anders Hagfeldt, Stefano Turri, Claudio Gerbaldi, Improving efficiency and stability of perovskite solar cells with photocurable fluoropolymers, Science, 2016.
[7] Federico Bella, Gianmarco Griffini, Juan-Pablo Correa-Baena, Guido Saracco, Michael Grätzel, Anders Hagfeldt, Stefano Turri, Claudio Gerbaldi, op. cit.

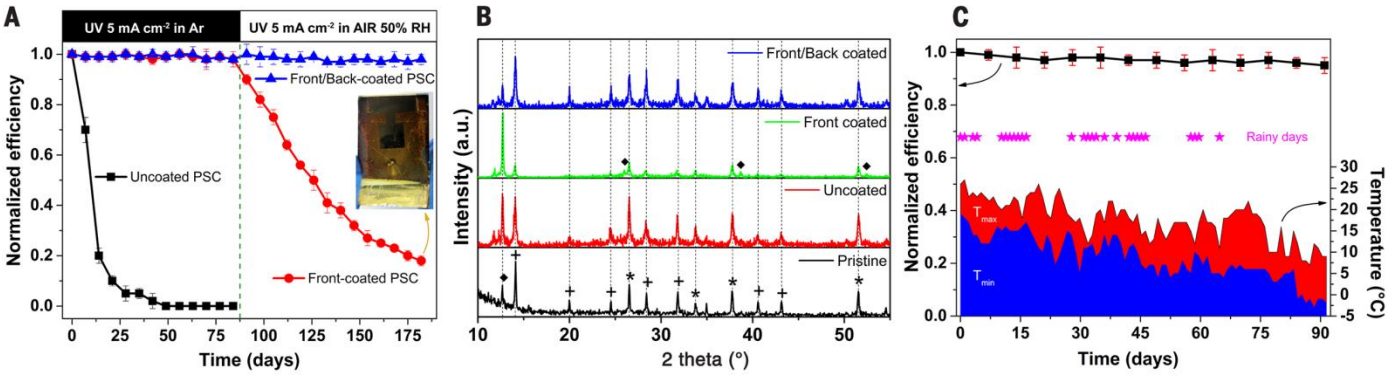


Figura 1.4 *A) Risultati del test ad invecchiamento con irraggiamento UV per diversi tipi di rivestimento, B) X-ray Power Diffraction (XRD), C) Andamento dell'efficienza durante il test di invecchiamento all'aperto. Figura ri-adattata dalla referenza*[8]

Nonostante i buoni risultati raggiunti, le prove di durata sono ben lontane da essere rappresentative della durata tipica di un impianto fotovoltaico (circa 20 anni). Pertanto, per accorciare i tempi necessari allo studio di invecchiamento, è utile sfruttare un irraggiamento concentrato, maggiore di quello solare. A questo scopo vengono normalmente utilizzati dei macchinari di laboratorio. Il lavoro presente si propone invece di sfruttare un concentratore solare, che ha il vantaggio di lavorare già in condizioni di ambiente esterno.

1.2 Solare a concentrazione: tecnologie

Il Solare a concentrazione (o CSP, Concentrated Solar Power) utilizza l'energia solare per produrre calore ad alta temperatura. Il parametro caratterizzante di questa tecnologia è il fattore di concentrazione f_c, che indica il rapporto tra l'irraggiamento specifico I_s (W/m^2) convogliato sul ricevitore e l'irradianza solare incidente sul sistema I_c.

$$f_c = \frac{I_s}{I_c} \tag{1.1}$$

Tanto più questo parametro è elevato, maggiore è la temperatura massima raggiungibile dal collettore. Una temperatura più alta permette, a parità di energia raccolta, di massimizzare l'efficienza exergetica del sistema. Per questo motivo il solare a concentrazione è particolarmente indicato per sistemi di conversione di energia ad alta exergia, come la produzione di energia elettrica o di calore ad alta temperatura.

Le principali tecnologie sviluppate sono le seguenti:

[8] Ivi.

1) I Collettori a Cilindro Parabolico sono costituiti da superfici lineari a sezione parabolica. È attualmente la tecnologia più estesa del solare a concentrazione, coprendo il 93,6% degli 821,9 MW complessivi installati in tutto il mondo[9]. La superficie della parabola è rivestita da uno strato di materiale altamente riflettente a base di argento o alluminio, in grado di riflettere oltre il 90% della radiazione solare incidente.

   Un meccanismo di sostegno permette agli specchi di ruotare intorno all'asse, per inseguire il sole nel corso della giornata. La disposizione dell'asse nella direzione nord-sud permette un carico assorbito maggiormente costante nel tempo, la disposizione ovest- est ha il vantaggio di consentire una potenza di picco più alta.

   Il ricevitore è costituito da un tubo rivestito di materiale assorbente e con un basso indice di emissione nello spettro dell'infrarosso. Un ulteriore tubo di vetro concentrico al primo, in condizioni di vuoto, permette di minimizzare la dispersione di calore per convezione.

   All'interno dei tubi circola un fluido termovettore, tipicamente un olio minerale, che può raggiungere alte temperature (400°C circa). Il fluido caldo viene quindi convogliato nella centrale, dove può venire utilizzato in tempo reale per la produzione di energia elettrica, grazie ad un ciclo Rankine, oppure può venire temporaneamente immagazzinato in serbatoi isolati termicamente, per una produzione differita. In questo caso è possibile svincolare almeno in parte la produzione di energia elettrica dalla disponibilità di radiazione solare.

Figura 1.5 *Collettore solare Solarlite SL 4600. Figura ri-adattata dalla referenza* [10]

2) I Collettori a Torre Solare sono la tecnologia che in assoluto permette di massimizzare il rapporto di concentrazione. Questi impianti infatti sono costituiti da un campo di specchi riflettenti detti eliostati e da un unico ricettore posto in cima ad una torre. La dimensione

[9] Matthias Günther, Michael Joemann, Simon Csambor, Advanced CSP Teaching Materials, Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt.
[10] Joe Coventry, Charles Andraka, Dish systems for CSP, Solar Energy 2017.

degli eliostati può variare da 1 m^2 fino a diverse decine di m^2. Ogni singolo eliostato è montato su un supporto che ne permette la rotazione intorno a due assi, in modo da riflettere la radiazione solare sul ricevitore.

Il ricevitore è composto da una camera con un'apertura nella direzione di provenienza dei raggi, all'interno della quale sono avvolti dei tubi nei quali scorre il fluido di raffreddamento. Essendo la superficie del ricevitore piccola rispetto alla densità di potenza entrante, il calore disperso per convezione è ridotto. Al contrario, date le alte temperature raggiunte, le dispersioni per irraggiamento sono significative. In analogia a quanto avviene per i collettori a cilindro parabolico, anche in questo caso è possibile la produzione istantanea oppure l'accumulo in appositi serbatoi.

Figura 1.6 *Impianto solare del tipo a Torre Solare. Figura ri-adattata dalla referenza* [11]

3) I Collettori a Disco Parabolico, di cui fa parte la parabola di Innova istallata al Politecnico di Torino che verrà analizzata in seguito, sono tecnologicamente simili ai collettori a cilindro parabolico. A differenza di queste ultime, lo specchio riflettente ha la forma di un paraboloide, conseguentemente la radiazione è concentrata in modo puntiforme sul ricettore, che è posizionato nel fuoco.

   Vengono utilizzate principalmente per la produzione di energia elettrica, in modo da sfruttare l'alta temperatura raggiunta sul ricevitore, ma vengono anche impiegate per la

[11] Joe Coventry, Charles Andraka, Dish systems for CSP, Solar Energy 2017.

produzione di calore (es. acqua calda sanitaria) oppure per altre applicazioni come la desalinizzazione dell'acqua.

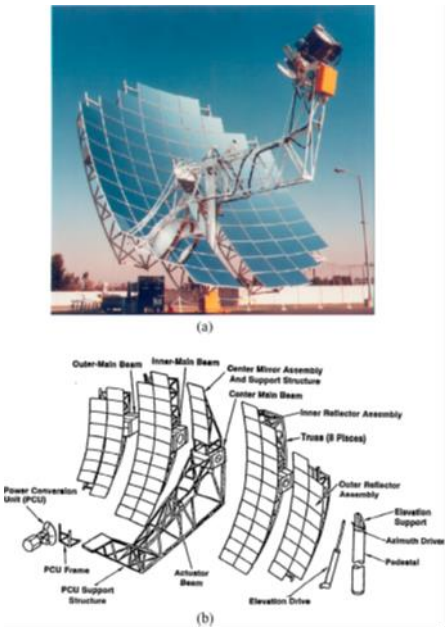


Figura 1.7 Struttura di un Collettore a Disco Parabolico. Figura ri-adattata dalla referenza [12]

I Collettori a Disco Parabolico sono in grado di fornire alti rapporti di concentrazione. Le alte temperature raggiunte garantiscono un'ottima efficienza exergetica, possono quindi essere sfruttate per la produzione di energia elettrica. La tecnologia più utilizzata per questa applicazione è un motore Stirling, posizionato direttamente in prossimità del fuoco. Il funzionamento di un ciclo Stirling ideale si basa sull'assorbimento e la cessione di calore di un gas di lavoro verso due termostati posti a temperature diverse. L'intero ciclo è composto da quattro processi:

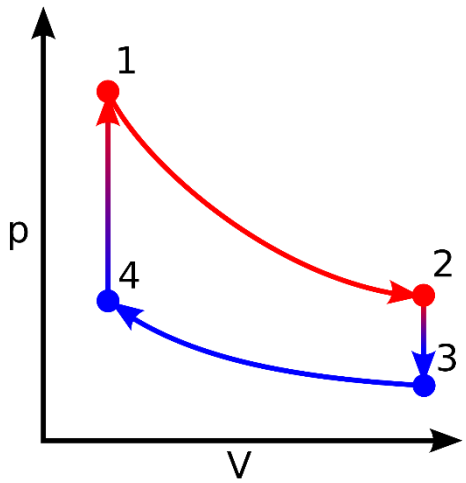


Figura 1.8 Ciclo Stirling

- Da 1 a 2: espansione isotermica del gas con assorbimento di calore dal termostato caldo;
- Da 2 a 3: trasformazione isocora con rilascio di calore;
- Da 3 a 4: compressione isoterma con rilascio del calore al termostato freddo;
- Da 4 a 1: riscaldamento isocoro.

Il motore Stirling è particolarmente adatto alle applicazioni sul solare concentrato, in quanto,

[12] Joe Coventry, Charles Andraka, Dish systems for CSP, Solar Energy 2017

differentemente da quanto avviene per i cicli a combustione interna, il gas di lavoro è contenuto all'interno del motore ed è isolato dalla fonte di calore. Dal momento che il gas non deve essere riciclato al termine di ogni ciclo, richiede un design meno complesso e di conseguenza questi motori risultano essere più affidabili e richiedono meno manutenzione. D'altro canto, è necessario un ottimo scambio termico per permettere al fluido di scaldarsi e raffreddarsi nell'intervallo di tempo di un ciclo. Per migliorare lo scambio termico, molti motori di tipo Stirling sono dotati del rigeneratore, un componente interno al motore che accumula calore nella fase del ciclo 2-3 (raffreddamento isocoro), per poi rilasciarlo nella fase 4-1 (riscaldamento isocoro).

Secondo uno studio condotto da Wu et al.[13], l'efficienza di conversione in energia elettrica di un sistema di concentrazione solare accoppiato ad un motore Stirling raggiunge un valore di 20,6%, per un motore di potenza elettrica pari a 18,54 kW.

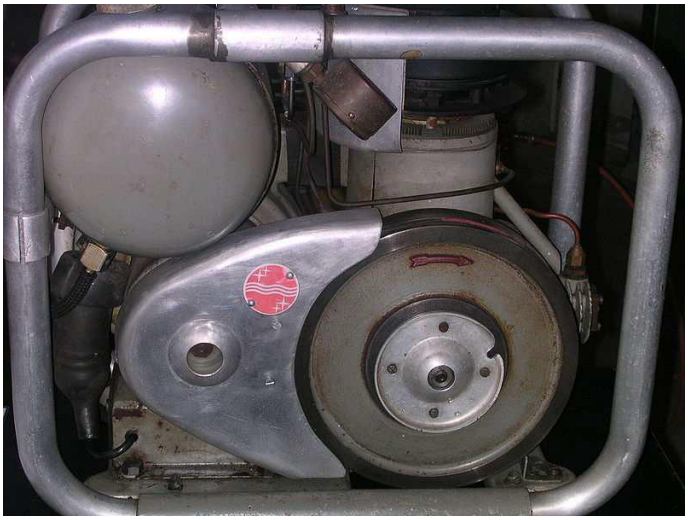


Figura 1.9 *Motore del tipo Philips Stirling. Figura ri-adattata dalla referenza* [14]

L'utilizzo del solare a concentrazione per la produzione di energia termica è conveniente quando esiste una richiesta di calore ad a media- alta temperatura. Una simulazione effettuata da un gruppo di ricerca della facoltà di ingegneria meccanica di Nis (Serbia), in collaborazione con l'università di

[13] Wu SY, Xiao L, Cao Y, Li YR. A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation. Appl Energy 2010.

[14] Matthias Günther, Michael Joemann, Simon Csambor, Advanced CSP Teaching Materials, Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt.

ingegneria di Atene[15], ha individuato il punto di maggior efficienza exergetica per una parabola con le caratteristiche seguenti:

- diametro del paraboloide pari a 3,8 m;
- coefficiente di riflessione della superficie del paraboloide di 0,6;
- distanza focale di 2,26m;
- ricevitore con tubo assorbente a spirale con diametro pari a 12,2 mm e lunghezza 9,5m;
- coefficiente di assorbimento del ricevitore pari a 0,9.

L'efficienza di primo principio è calcolata assumendo come calore entrante nel sistema l'energia solare totale incidente sulla parabola:

$$Q_s = A_c \ G_s \tag{1.2}$$

Dove A_c e G_s sono rispettivamente l'area di apertura della parabola e la radiazione solare incidente. Il calore utile è quello accumulato nel fluido termovettore:

$$Q_u = m \ c_p \ (T_{out} - T_{in}) \tag{1.3}$$

Da cui si ricava l'efficienza di primo principio:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} \tag{1.4}$$

Per quanto riguarda il bilancio exergetico, l'exergia ricavata è la seguente:

$$E_u = Q_u - T_{amb} \ \Delta S \tag{1.5}$$

Dove E_u è l'exergia massima ottenibile e ΔS indica la variazione di entropia nel passaggio tra energia solare ed energia termica immagazzinata nel liquido di raffreddamento. L'exergia entrante dal sole E_s è ricavata dal modello di Petela, il quale tiene conto della distribuzione spettrale della radiazione solare. Ne segue l'efficienza di secondo principio:

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_s} \tag{1.6}$$

[15] Velimir P. Stefanovic, Sasa R. Pavlovic, Evangelos Bellos, Christos Tzivanidisb, A detailed parametric analysis of a solar dish collector, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2018.

Attraverso un processo di ottimizzazione, variano alcuni parametri tra i quali l'irraggiamento solare e la velocità del vento, è stato ricavato che la massima efficienza exergetica si raggiunge per una temperatura del fluido in ingresso pari a 212.3 °C e una portata di 314.6 l/h[16].

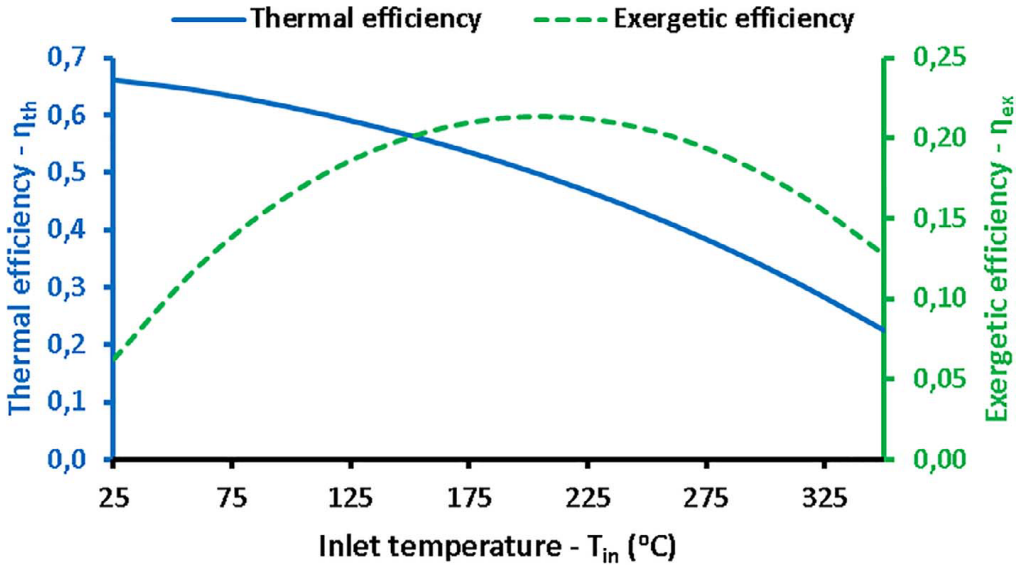


Figura 1.10 *Influenza della temperatura del fluido in ingresso sull'efficienza termica ed exergetica. Figura ri-adattata dalla referenza* [17]

1.3 Analisi geometrica e strutturale di un Collettore a Disco Parabolico

Un collettore solare del tipo a Disco Parabolico, è costituito da varie componenti:

- La struttura a forma di paraboloide, che costituisce la parte riflettente;
- Il ricevitore, che ha il compito di convertire l'energia solare incidente in energia termica, comprensivo di sostegno;
- Uno stelo di sostegno per ancorare la struttura, dotato di un sistema di movimentazione lungo due assi, per permettere l'inseguimento della traiettoria solare lungo la giornata.

La progettazione del paraboloide è basata su tre parametri:

- La distanza focale f, indica la distanza tra il punto focale e il vertice della parabola;
- Il diametro di apertura D, permette di ricavare l'area ricevente normale alla radiazione solare;

[16] Velimir P. Stefanovic, Sasa R. Pavlovic, Evangelos Bellos, Christos Tzivanidisb, op. cit.
[17] Ivi.

- L'angolo di rim ψ, è l'angolo tra l'asse ottico della parabola e la retta che congiunge il fuoco con il bordo esterno della parabola.

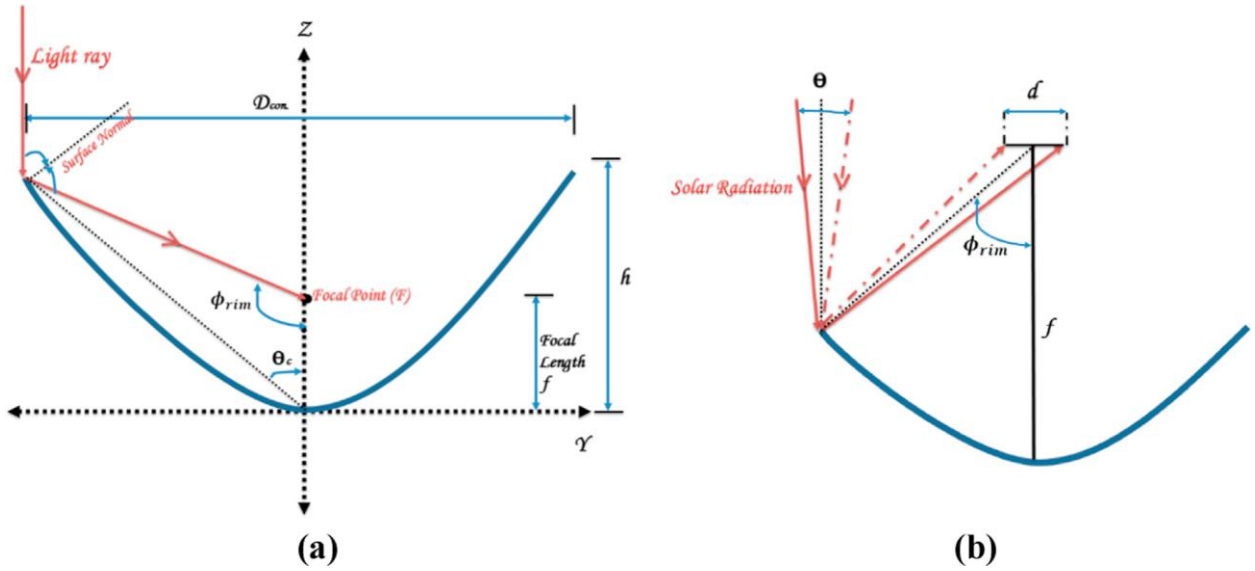


Figura 1.11 *(a) Parametri geometrici di un collettore solare a disco parabolico. (b) Riflessione di un raggio non perfettamente parallelo all'asse del paraboloide. Figura ri-adattata dalla referenza*[18]

Sono sufficienti due tra questi tre parametri per determinare la geometria completa della parabola. La relazione che li lega è la seguente:

$$\frac{D}{f} = -\frac{4}{tan\psi} + \sqrt{\frac{16}{tan^2\psi} + 16} \tag{1.7}$$

Il profilo geometrico della parabola è determinato dall'equazione:

$$y = \frac{1}{4f}\, x^2 \tag{1.8}$$

Dove la variabile x assume i valori: [-D/2 +D/2]. Fissato il valore del diametro, si ottiene il profilo in funzione della distanza focale. A questo proposito è utile introdurre il termine FD, che indica il rapporto tra la distanza focale e il diametro della parabola.

$$FD = \frac{f}{D} \tag{1.9}$$

Di seguito sono rappresentati i profili di alcune parabole di diametro D = 3,75m al variare del rapporto FD (fig. 1.12).

[18] A.Z.Hafez, AhmedSoliman, K.A.El-Metwally , I.M.Ismail, Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications, Elsevier 2016

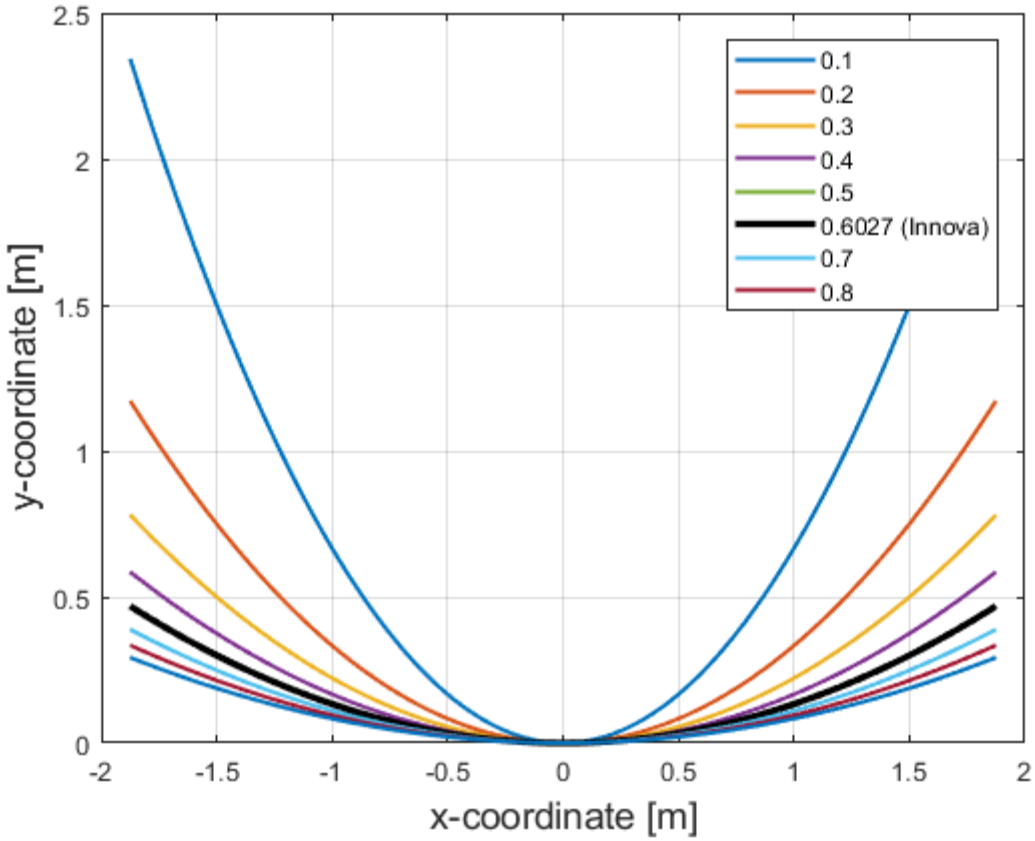


Figura 1.12 *Profilo di una parabola.di diametro 3,75 m al variare di FD.*

La curva in nero indica il profilo del paraboloide Innova del Politecnico di Torino. La scelta del valore di distanza focale ottimale richiede alcune considerazioni:

- Da un punto di vista puramente ottico- geometrico, senza considerare le imperfezioni reali della superficie, la scelta di una distanza focale maggiore è conveniente. Infatti, la superficie della parabola è ridotta a parità di irraggiamento captato, pertanto il rapporto di concentrazione aumenta.
- Considerando invece le imperfezioni e la rugosità della superficie, e la non perfetta orientazione del sistema verso il sole, è auspicabile mantenere la più piccola distanza possibile tra la parabola e il concentratore, in modo da minimizzare le perdite dovute all'aberrazione ottica. Ciò limita la scelta della distanza focale a valori né troppo piccoli né troppo alti, come da figura 1.12. Incrementando il rapporto FD (e di conseguenza la distanza focale) infatti, il fuoco si sposta ad una distanza sempre più ampia dalla superficie della parabola. Al contrario, per valori di FD molto piccoli la parabola risulta molto incurvata (fig. 1.13), di conseguenza la parte più esterna risulta parimenti lontana dal fuoco.

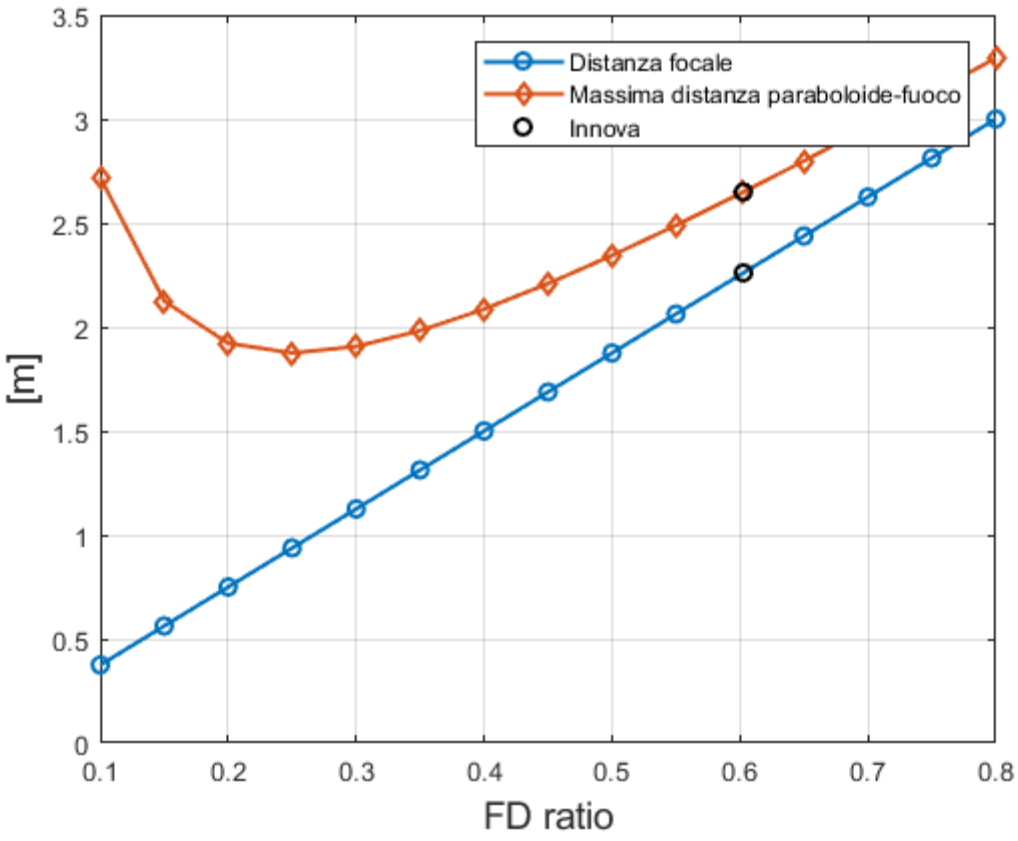


Figura 1.13 *Valori della distanza focale (linea blu) e della massima distanza paraboloide – fuoco (linea rossa) per una parabola di diametro 3,75 m.*

Dal punto di vista strutturale, è utile calcolare come varia la massa e il baricentro in funzione della distanza focale, per determinare la posizione ottimale degli ancoraggi e dei sistemi di movimentazione. Per i calcoli sono utilizzati i valori della parabola Innova, con i dati forniti dal costruttore (massa totale = 550 Kg, diametro = 3,75 m, distanza focale = 2,26 m). I dati mancanti, come la massa del ricevitore (incluso il fluido termovettore), la massa del braccio di sostegno e del paraboloide, sono stimati essendo noti la geometria e la densità dei materiali.

L'altezza del baricentro della sola superficie parabolica è calcolata con l'integrale seguente:

$$y_G = \int_0^{D/2} \frac{1}{4\,fL}\, t^2 \sqrt{1 + \frac{1}{4\,fL^2}\, t^2}\;\; dt\, \frac{1}{L} \tag{1.10}$$

Dove L è calcolato come:

$$L = \int_0^{D/2} \sqrt{1 + \frac{1}{4\,fL^2}\, t^2}\;\; dt \tag{1.11}$$

Il baricentro del sistema complessivo (misurato dal vertice del paraboloide) è calcolato considerando la massa e l'altezza del baricentro di ogni componente. La massa della parabola è assunta valere in proporzione alla superficie della stessa, così come la massa del braccio di sostegno del ricettore. Le altre masse sono assunte costanti. Il risultato è mostrato in fig. 1.14.

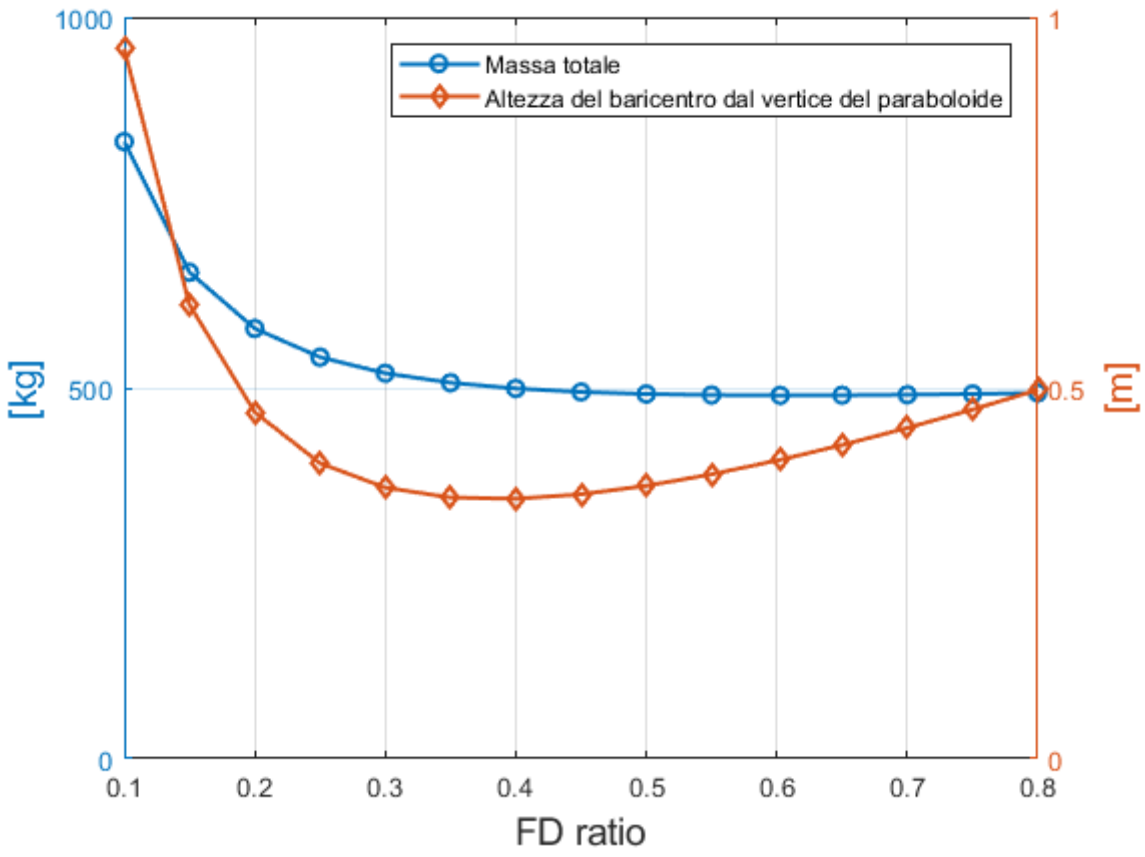


Figura 1.14 *Valori della massa totale (linea blu) e dell'altezza del baricentro (linea rossa) per una parabola di diametro 3,75 m.*

Come è possibile notare dal grafico, la massa tende a diminuire con l'aumentare del rapporto FD con un andamento asintotico, con un guadagno in termini di materiale e di semplicità costruttiva. La scelta del rapporto FD della parabola di Innova (0,6 circa) è data da una sintesi di questo aspetto con i vincoli di aberrazione ottica. L'altezza del baricentro invece raggiunge un minimo per valori di FD di 0,38 circa, per poi crescere per valori di FD maggiori. L'altezza del baricentro di Innova (40 cm), coincide con il punto di ancoraggio del sostegno sulla parabola, conferendo all'intera struttura una maggiore stabilità.

2. Analisi ottica del dispositivo

Per un corretto svolgimento delle prove ad invecchiamento accelerato delle celle solari a Perovskite, è necessaria la conoscenza della quantità totale di radiazione incidente nel tempo della prova. Inoltre, è fondamentale garantire che la temperatura delle celle solari stia al di sotto di una determinata soglia, pena una rapida degradazione delle stesse[19]. Per condurre queste prove, è stato deciso di sfruttare il concentratore solare Innova istallato sul tetto di un edificio del Politecnico di Torino. Pertanto, per determinare i parametri di energia assorbita e temperatura, viene innanzitutto svolta una simulazione tramite il software Comsol Multiphysics, che rispecchi le caratteristiche ottiche del concentratore solare.

Figura 2.1 *Concentratore solare Innova. Figura ri-adattata dalla referenza* [20]

[19] Mesquita Isabel, Andrade Luísa, Mendes Adélio, Perovskite solar cells: Materials, configurations and stability, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
[20] Immagine tratta dalla scheda tecnica del concentratore solare Innova

La superficie riflettente del paraboloide è suddivisa in dodici spicchi, di cui uno mancante per permettere la corretta movimentazione della parabola. Le caratteristiche tecniche fornite dal produttore utili per l'impostazione della simulazione sono le seguenti:

Generale

- Superficie captante lorda: 11,23 m^2;
- Superficie captante netta: S =9,58 m^2;
- Efficienza ottica: η= 89,00 %;

Produzione termica

- Potenza termica di picco (DNI 1000 W/m2): 7,4 kW;

Materiali

- Riflettore: Multilaminar Aluminium Mirrors;

Dimensioni

- Diametro riflettore: D= 3,75 m;
- Ingombro massimo di manovra: d. 5,00 m x h. 4,60 m;
- Distanza focale: f= 2,26 m.

2.1 Basi teoriche di Comsol e impostazione dei parametri

Lo svolgimento della simulazione ottica è effettuato tramite il *Ray Optics Module Tool* di Comsol, ovvero "un tool computazionale per la modellazione della propagazione di onde elettromagnetiche attraverso domini nelle quali la lunghezza d'onda è molto minore a qualsiasi componente geometrico[21]".

La direzione con la quale vengono emessi i raggi dalla superficie della parabola è definita dalla relazione seguente:

$$\overline{n_r} = \overline{n_i} - 2\cos(\theta_i)\,\overline{n_s} \tag{2.1}$$

Dove $\overline{n_r}$ indica il versore della direzione dei raggi riflessi, $\overline{n_i}$ rappresenta la direzione dei raggi incidenti, mentre $\overline{n_s}$ è la direzione normale alla superficie nel punto dove avviene la riflessione.

[21] Comsol User's guide.

Per la simulazione, il software prende in considerazione la finitura della superficie introducendo il parametro *Standard deviation of the angle of incidence* (sda), che definisce la deviazione che subisce il raggio riflesso avente per unità di misura i milliradianti. Inoltre, attua un'ulteriore correzione che tiene in conto della dimensione finita del disco solare, che non si comporta come una sorgente puntiforme, e pertanto applica una intensità diversa a seconda del punto di origine sulla superficie del disco solare.

La geometria in Comsol è costruita creando una superficie di controllo all'interno della quale avviene la simulazione. Per semplificare la simulazione, è stato deciso di trascurare la disposizione in spicchi della superficie riflettente, e l'ingombro dovuto dai vari supporti. Le dimensioni esterne del ricettore sono le seguenti:

- Diametro esterno: 33 cm;
- Diametro interno: 20 cm;
- Altezza: 52 cm.

La struttura interna della camera in cui viene assorbita la radiazione solare con i tubi per lo scambio termico non è influente sul risultato della simulazione.

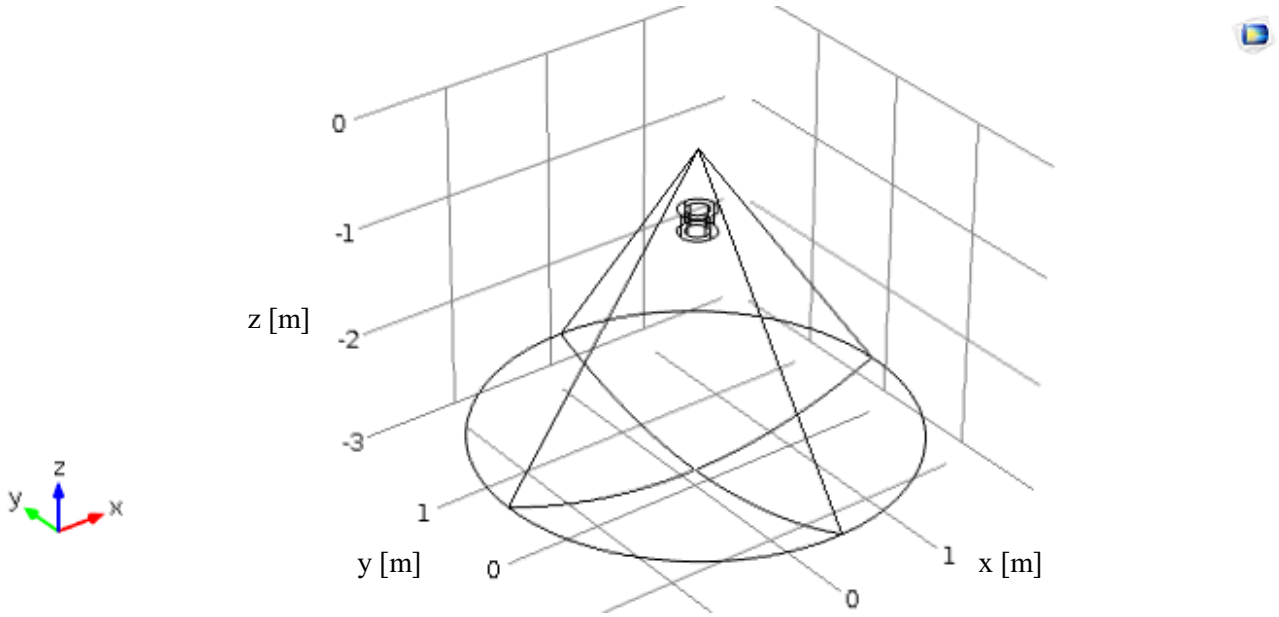


Figura 2.2 *Geometria della simulazione ottica.*

Per quanto riguarda i parametri ottici, il coefficiente di riflessione della superficie della parabola è assunto pari al valore di efficienza ottica dichiarato dal produttore (89%). Non avendo disponibili dati sulla finitura superficiale del materiale riflettente, per il parametro Sda è assunto un valore iniziale di 3.5 mrad, coincidente con il valore predefinito impostato su Comsol, il quale verrà in seguito modificato per ottenere una migliore coerenza con il sistema reale.

Il numero di punti totali dai quali sono rilasciati i raggi è scelto pari a 540, distribuiti uniformemente sulla superficie della parabola. Per ogni punto sono rilasciati 20 raggi per una migliore discretizzazione che tenga in conto degli errori causati dalla non uniformità della sorgente, e 20 raggi per considerare gli errori dovuti alla finitura superficiale, per un numero complessivo di raggi rilasciati per ogni simulazione di 216000. Il valore della radiazione solare normale incidente sulla parabola è impostato pari a 1000 W/m^2.

Un primo risultato della simulazione genera una distribuzione di irraggiamento sulla superficie cava del collettore come in figura 2.3.

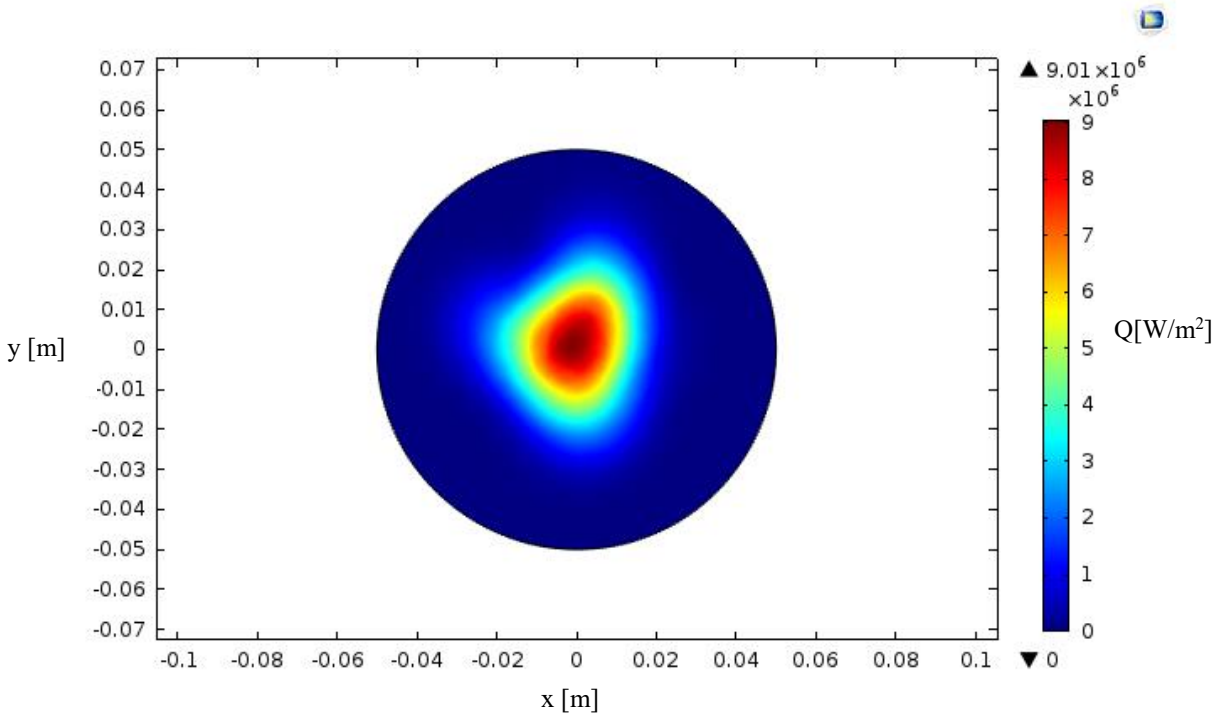


Figura 2.3 *Densità di potenza sulla superficie del ricettore*

Come indicato dalla guida utente di Comsol, questa distribuzione di irraggiamento è coerente con il modello implementato da Shuai et al.[22] per il calcolo della distribuzione di irraggiamento concentrato sul ricevitore di un collettore a Disco Parabolico. Ciò si può notare riportando su un grafico (fig. 2.4) la distribuzione radiale della radiazione sul ricettore ricavata dalla soluzione della simulazione ottica (linea blu), e quella prevista dal modello di Shuai (linea verde).

[22] Yong Shuai, Xin-Lin Xia, He-Ping Tan, "Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems," Solar Energy, vol. 82, pp. 13–21, 2008.

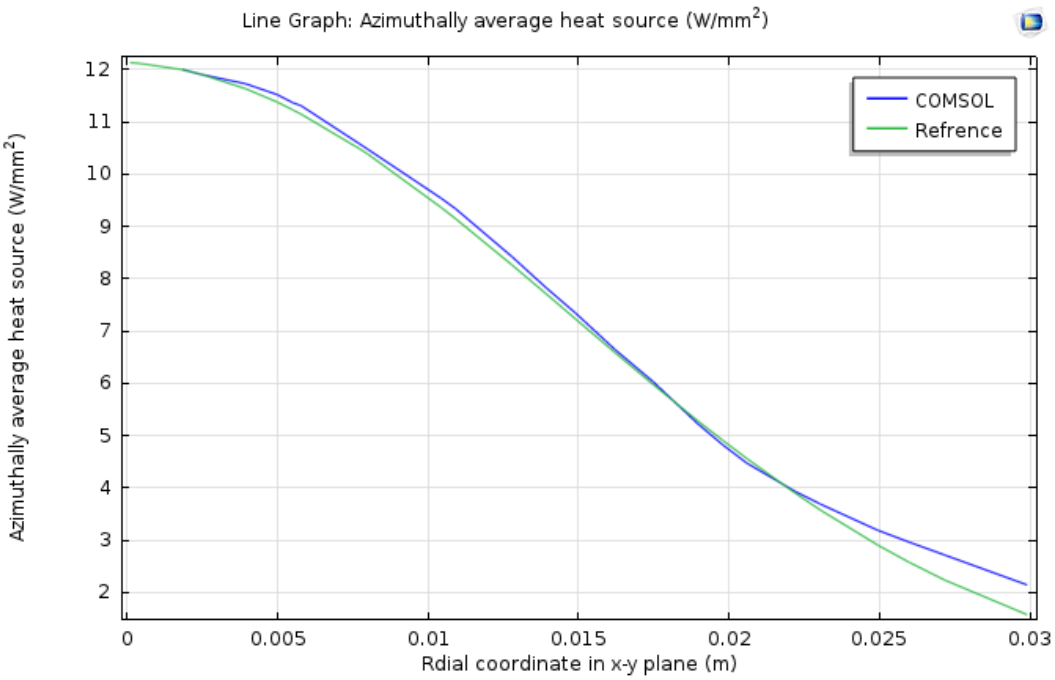


Figura 2.4 *Distribuzione radiale di irraggiamento concentrato sul ricevitore.*

2.2 Individuazione del parametro di deviazione dei raggi riflessi (Sda)

Come indicato in precedenza, per una prima simulazione è impostato per il parametro Sda un valore di 3,5 mrad, che tuttavia non rispecchia la condizione reale della parabola Innova. Oltre ad includere la rugosità della superficie, questo parametro deve essere modificato per tenere in conto della non perfetta orientazione della parabola verso il sole (dovuta al sistema di puntamento o a flessioni dell'intera struttura causate dal vento), e delle possibili imperfezioni geometriche della superficie riflettente.

Non avendo a disposizione sistemi in grado di rilevare la distribuzione radiale di radiazione sul collettore per confrontarle con quelle simulate con il software, il parametro è stimato grazie ad una rilevazione di una fotocamera ad infrarossi, da cui è possibile ricavare la temperatura del disco di protezione frontale del collettore durante le condizioni di funzionamento (fig. 2.5 e 2.6).

Figura 2.5 *Fotografia del ricettore.*

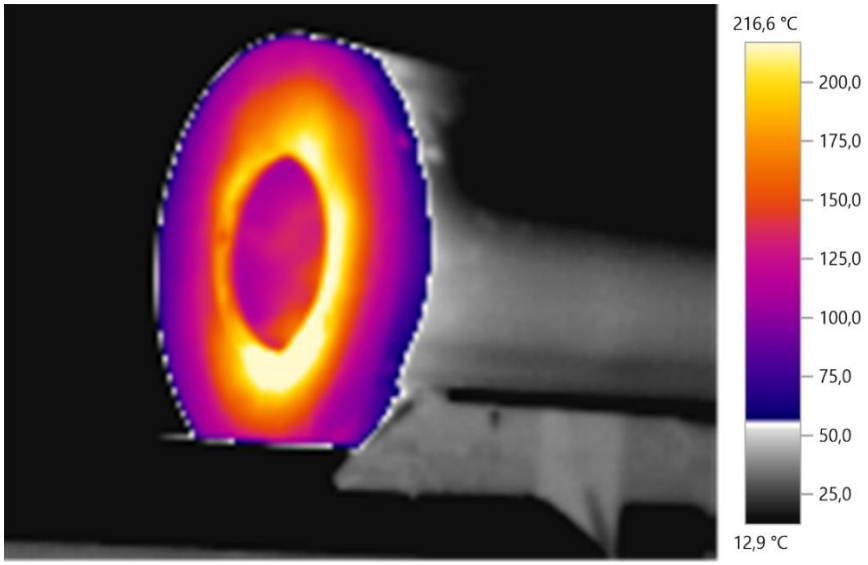


Figura 2.6 *Immagine ad infrarossi del ricettore.*

Tramite una simulazione ottica si può ricavare il valore di irraggiamento specifico sul disco di protezione al variare del valore di Sda. Tramite una simulazione termica successiva è possibile pertanto ricavare la temperatura e confrontarla con la rilevazione ad infrarossi per la determinazione del valore corretto di Sda.

Simulazione ottica

Tramite la funzione *sweep* di Comsol, che permette di ottenere per un'unica simulazione la soluzione in funzione di un parametro selezionato, sono verificati diversi valori di Sda, utilizzando per tutti gli altri parametri quelli della simulazione ottica impostata in precedenza. Viene quindi

ricavata la distribuzione di irraggiamento sul disco di protezione del collettore. Di seguito è possibile visualizzare una rappresentazione grafica per un valore di Sda pari a 12,3 mrad (fig. 2.7).

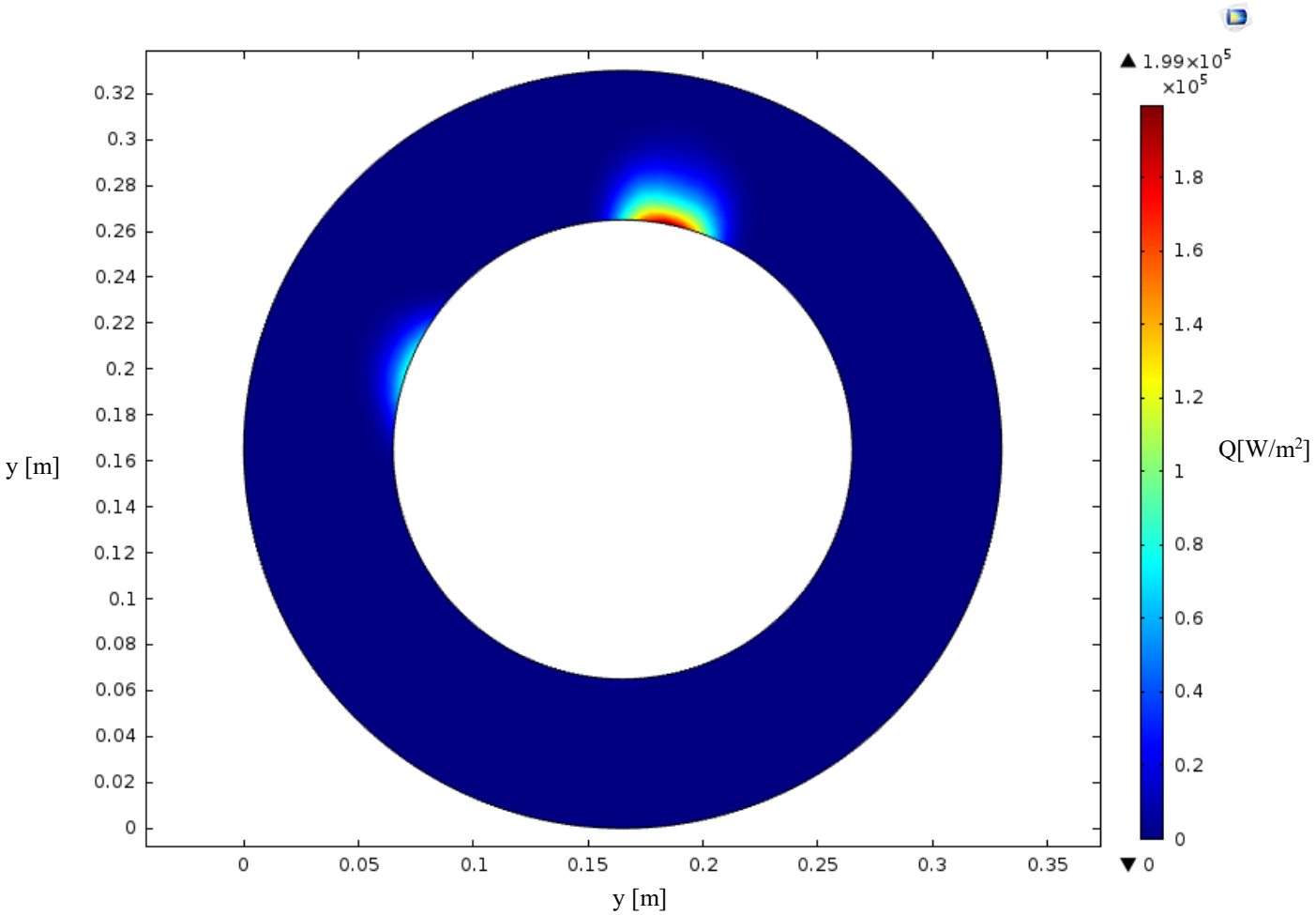


Figura 2.7 *Distribuzione di irraggiamento specifico sul disco di protezione del collettore.*

La distribuzione non uniforme dell'irraggiamento nella direzione radiale è probabilmente dovuta alla discretizzazione effettuata da Comsol. Si noti che la stessa disuniformità era presente anche nella simulazione con la superficie del collettore piena, tuttavia per quel caso era meno evidente per la maggior densità di radiazione nella parte centrale, superiore per due ordini di grandezza rispetto all'esterno.

Simulazione termica

Terminata la simulazione ottica, viene implementata una simulazione termica sul disco di protezione, avente come condizione al contorno l'irraggiamento ricavato dalla simulazione ottica e importato tramite la funzione *interpolation* di Comsol. L'obiettivo è quello di trovare il valore del parametro Sda per cui la temperatura simulata sul disco sia più vicina possibile a quella della rilevazione ad infrarossi. Le proprietà impostate nella simulazione sono le seguenti:

- Diametro interno del disco: 200 mm;
- Diametro esterno: 330 mm;
- Spessore: 20 mm;
- Materiale: acciaio (k= 16,2 W/(m^2 K); ρ= 7930 Kg/m^3; coeff. di assorbimento α= 0,6, emissività ε= 0,2).

Le condizioni ambiente considerate sono le seguenti:

- Temperatura ambiente: 20 °C;
- Irraggiamento diretto incidente sulla parabola: 1000 W/m^2 (ipotesi conservativa);
- Coefficiente di convezione sulla superficie del collettore: 10 W/(m^2 K);
- Scambio di calore verso la parte interna del collettore nullo.

La temperatura media raggiunta dal disco di protezione in funzione del parametro Sda è rappresentata nel grafico in figura 2.8.

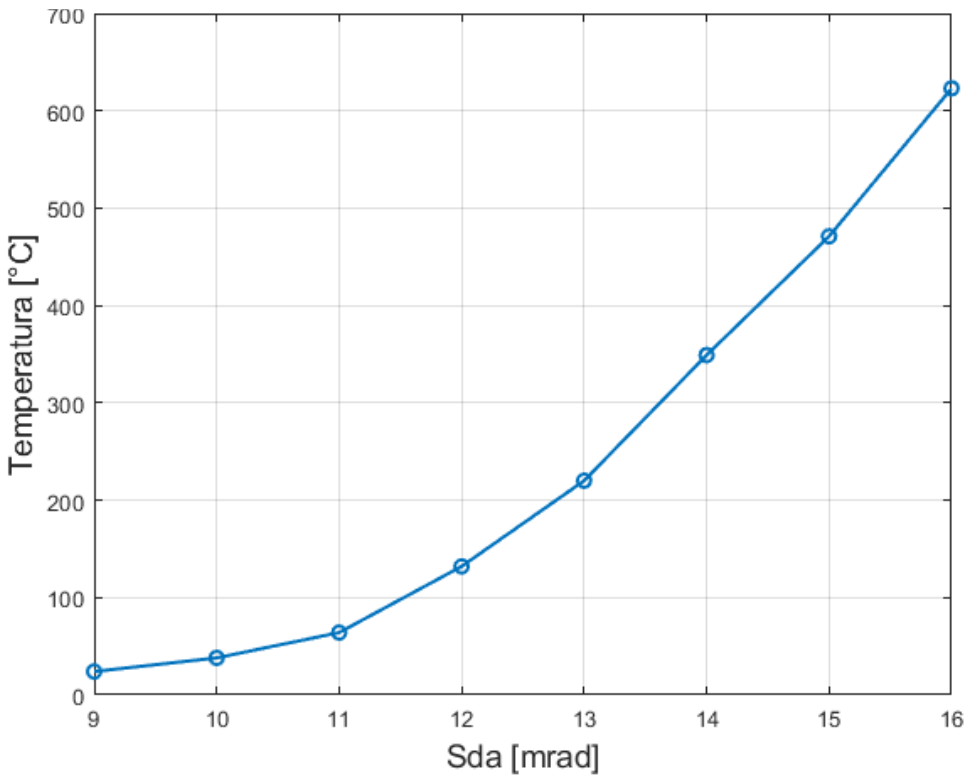


Figura 2.8 *Andamento della temperatura media del collettore al variare del parametro Sda.*

Effettuando un'ulteriore simulazione per parametri nell'intervallo vicino alla temperatura obiettivo (12- 14 mrad), viene scelto come valore finale del parametro Sda 12,3 mrad, al quale è associata una temperatura media sul disco del collettore di 154 °C.

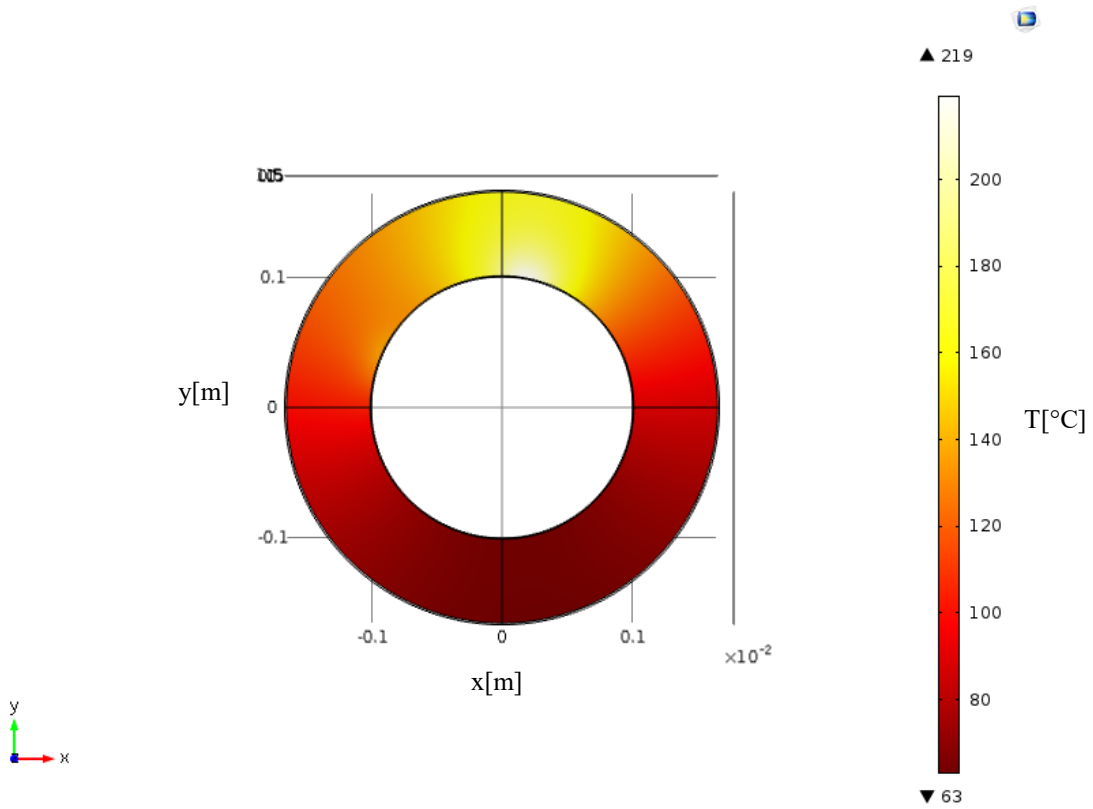


Figura 2.9 *Temperatura simulata per un valore del parametro Sda pari a 12,3 mrad.*

Per questo valore di Sda, nella porzione cava del ricevitore la radiazione complessiva entrante (con un valore di irraggiamento solare diretto incidente sulla parabola pari a 1000 W/m^2) è di 8072.9 W. Il valore fornito da Innova per potenza termica di picco, per lo stesso valore di irraggiamento solare, è di 7400 W. Ipotizzando un'efficienza non unitaria di conversione del calore per irraggiamento in energia termica, il valore ricavato dalla simulazione risulta verosimile.

2.3 Variazione della posizione del ricevitore e correzione degli errori

L'irraggiamento sulla superficie del collettore (situata nel fuoco della parabola), assume valori di diverse centinaia di kW/m^2. Per concentrazioni così alte sarebbe molto difficile mantenere la temperatura delle celle solari al di sotto la soglia di degradazione. Per ottenere valori di irraggiamento più moderati, la superficie sulla quale verranno installate le celle deve essere situata lontano dal fuoco. Pertanto, sono state condotte alcune simulazioni mantenendo il punto centrale della superficie del ricevitore sull'asse del paraboloide, ma facendo variare la distanza dal fuoco per posizioni progressivamente più vicine al vertice della parabola. I valori di irraggiamento specifico

ricercati variano da 2 a 10 kW/m^2, che corrispondono a 2x e 10x invecchiamenti accelerati, restando comunque necessaria una verifica della temperatura raggiunta per tali valori.

La superficie che ospiterà le celle solari è un quadrato avente il lato di 10 cm. Dopo alcune simulazioni, viene ricavato che il range di distanza dal fuoco a cui deve mantenersi la superficie per avere i valori di irraggiamento cercati è di circa 50- 150 cm.

Tuttavia, la soluzione non ha un andamento geometrico definito (come visibile in figura 2.10), inoltre variando il numero di raggi simulati (inizialmente 216000), la soluzione non rimane costante, inducendo a pensare a qualche errore di discretizzazione.

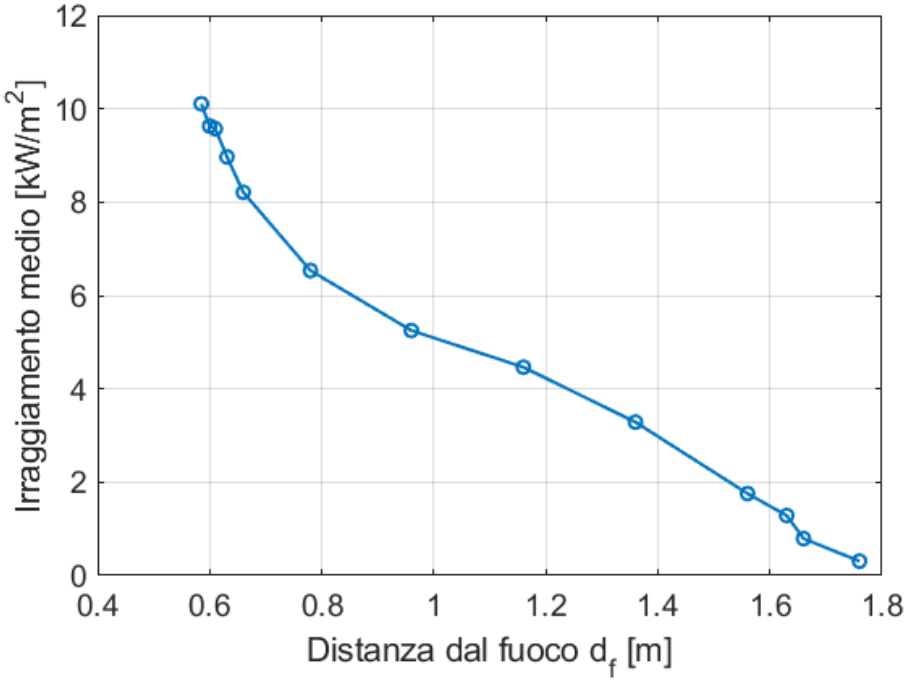


Figura 2.10 *Valore dell'irraggiamento sulla superficie ricevente al variare della distanza dal fuoco (DNI 1 kW/m^2).*

Si è pensato quindi che il problema potesse essere dovuto al numero insufficiente di raggi simulati dal software, nonostante il numero di raggi non fosse esiguo, e la simulazione richiedesse un tempo computazionale abbastanza esteso per essere portata a termine (circa mezz'ora su quattro *cores* fisici). Infatti, per un semplice fattore geometrico, per distanze della superficie ricevente sufficientemente lontane dal fuoco, la porzione di raggi riflessi dalla parabola intercettati dalla superficie risulta una piccola frazione di quelli totali, come visibile in figura 2.11.

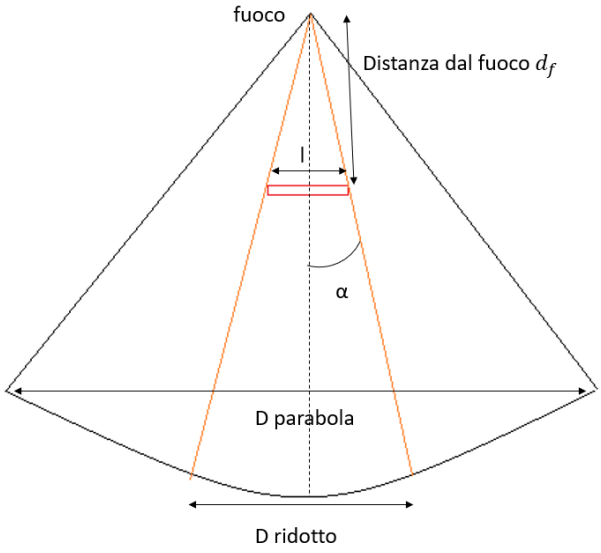


Figura 2.11 *Schema di valutazione del "diametro ridotto".*

La superficie della parabola 'utile' ai fini della simulazione è quella compresa all'interno del diametro ridotto D_r. Per tenere in conto di questo effetto, si è deciso di eliminare dalla simulazione la porzione di parabola esclusa, a meno di una quantità definita che serve per tenere in considerazione le deviazioni dei raggi dovute alle imperfezioni del sistema.

Analiticamente, il valore del diametro ridotto si ottiene risolvendo il sistema dell'equazione della parabola e dell'equazione della retta passante per il fuoco e per il bordo esterno della superficie ricevente:

$$\begin{cases} y = \dfrac{1}{4\,fL}\,{D_r}^2 \\ y = fL - \tan\left(\dfrac{\pi}{2} - \alpha\right) D_r \end{cases} \tag{2.2}$$

Dove α è calcolato come:

$$\alpha = \tan^{-1}\frac{l}{x} \tag{2.3}$$

La soluzione è la seguente:

$$D_r = -2\,fL\tan\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + 2\,fL\sqrt{tan^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) + 1} \tag{2.4}$$

Per ogni posizione della superficie ricevente, risulta possibile associare un diametro ridotto minimo. Come è stato detto, a questo valore è conveniente sommare un'ulteriore porzione di diametro per consentire alla simulazione di intercettare ulteriori raggi provenienti dalla porzione più esterna della parabola e deviati a causa della finitura superficiale della parabola. Vengono quindi effettuate

alcune simulazioni a partire dal diametro ridotto minimo ed aumentando progressivamente il valore del diametro, per verificare quale sia effettivamente il valore più conveniente da assumere. Sulle simulazioni precedenti in Comsol, l'irraggiamento incidente totale sulla parabola (Power source P_{src}[W]) era ricavato moltiplicando l'area captante netta (A_n) per la radiazione solare incidente (I_{sun}). Per questo nuovo caso l'irraggiamento incidente è calcolato come segue:

$$P_{src} = I_{sun} A_n \left(\frac{D_r}{D}\right)^2 \tag{2.5}$$

Dove D_r rappresenta il diametro ridotto, D è il diametro iniziale della parabola (3,75 m).

2.4 Risultati dell'analisi ottica

L'obiettivo della simulazione ottica impostata tramite il software Comsol Multiphysics è quello di ricavare l'irraggiamento specifico medio su una superficie di 100 cm^2 circa, in funzione della distanza dal fuoco, così da studiare termicamente il supporto per l'invecchiamento accelerato delle celle fotovoltaiche.

In figura 2.12 è possibile visualizzare la traiettoria dei raggi riflessi dalla superficie del paraboloide. I punti di rilascio dei raggi sulla superficie sono 540, per ogni punto viene emesso un numero iniziale di 200 raggi, per la correzione sulla non uniformità della sorgente e sulla finitura superficiale.

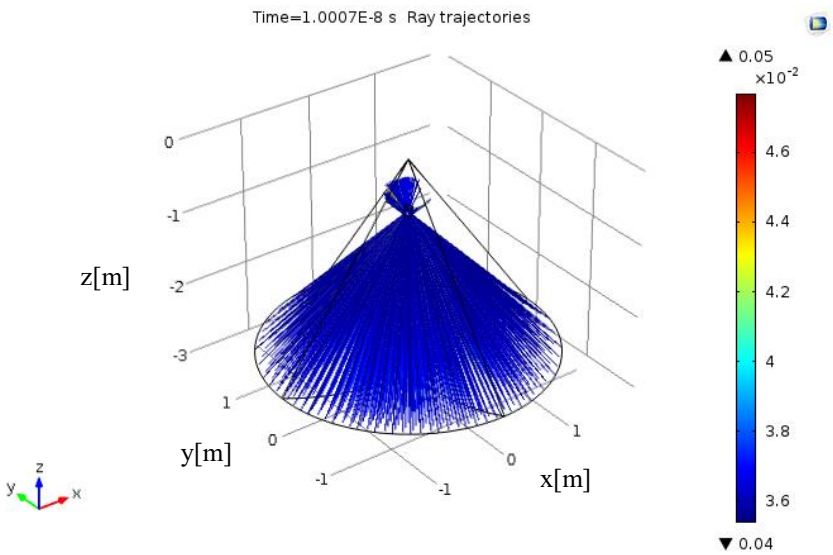


Figura 2.12 *Traiettoria dei raggi simulati.*

L'irraggiamento desiderato massimo utile per i test ad invecchiamento accelerato deve essere compreso tra i 2 e i 10 kW/m^2 circa. L'irraggiamento solare diretto incidente sulla superficie della parabola è assunto pari a 1000 W/m^2, valore simile al massimo irraggiamento possibile nel corso di un anno per la città di Torino, dove viene svolto il test.

Di seguito è riportata la soluzione al variare del numero di raggi simulati (fig. 2.13).

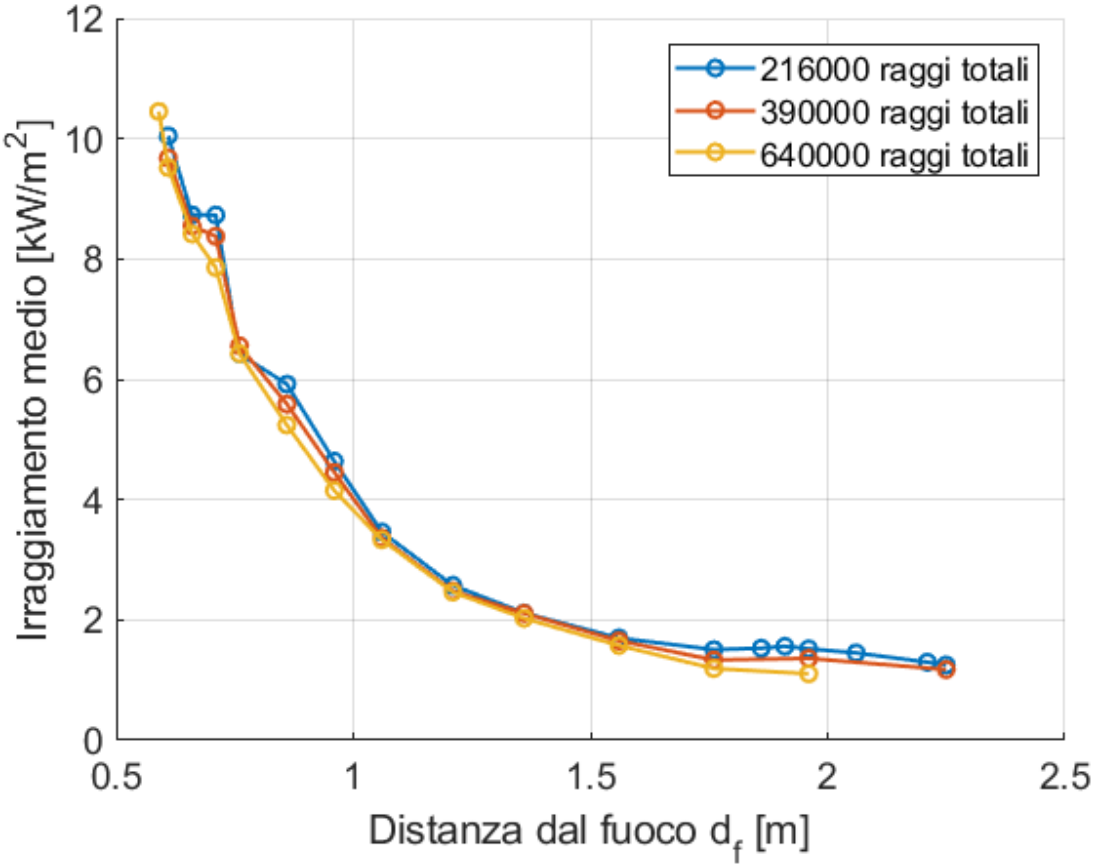


Figura 2.13 *Valore dell'irraggiamento sulla superficie ricevente al variare della distanza dal fuoco, per diverse quantità di raggi simulati (DNI 1 kW/m^2).*

È visibile ancora qualche piccola discontinuità nell'andamento dell'irraggiamento specifico medio dovuto ai problemi di discretizzazione per il numero più basso di raggi simulati (216000), per un numero di raggi tre volte maggiore (640000) le discontinuità sono praticamente azzerate.

Può essere utile confrontare i dati ottenuti con la simulazione in Comsol con una soluzione puramente geometrica. La procedura seguita per la soluzione geometrica è simile a quella già indicata nella sezione 2.3. Infatti, avendo ricavato il diametro ridotto per una determinata distanza dal fuoco, è possibile ricavare il valore di irraggiamento specifico con la formula seguente:

$$I_c = \frac{\pi \frac{{D_r}^2}{4} I_{sun}}{A_c} \tag{2.6}$$

Dove I_{sun} è l'irraggiamento solare incidente di riferimento, D_r è il valore del diametro ridotto e A_c è l'area della superficie ricevente.

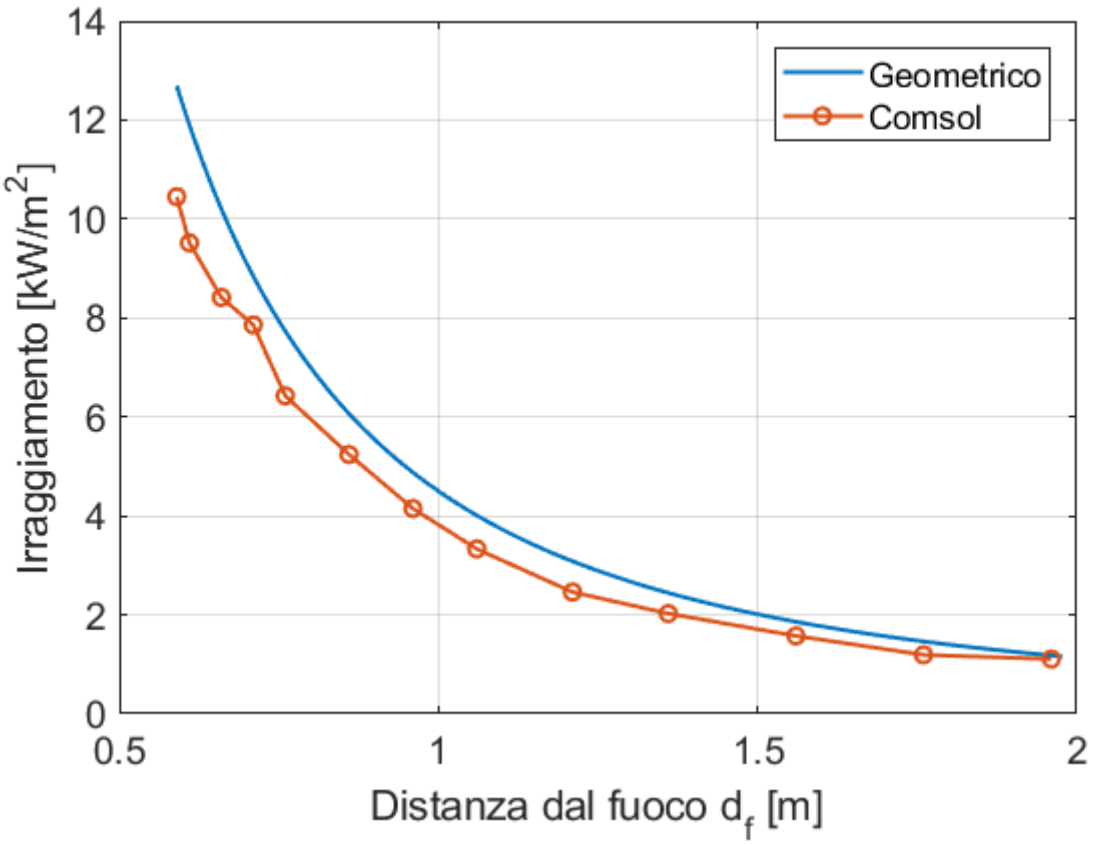


Figura 2.14 *Confronto dell'irraggiamento ottenuto tramite la simulazione e quello calcolato geometricamente (DNI 1 kW/m²).*

La soluzione simulata tramite Comsol è inferiore a quella geometrica del 15% circa, effetto dovuto alle imperfezioni della superficie della parabola reale, che tendono a disperdere i raggi riflessi su una superficie più ampia rispetto a quella calcolata geometricamente per un caso ideale.

Un'ultima considerazione è da effettuarsi sulla fattibilità di installazione della superficie ricevente sulla parabola. Non tutto l'asse della parabola è infatti accessibile per il montaggio di una staffa di sostegno per la piastra ricevente. La freccia visibile in figura 2.15, indica la porzione del braccio di sostegno del ricevitore priva di ingombri utilizzabile per il montaggio della piastra, che misura un metro a partire dal fuoco della parabola. Come è possibile ricavare dal grafico precedente, ciò permette di ottenere un irraggiamento massimo compreso da circa 4 ad oltre 10 kW/m^2. Valori inferiori di irraggiamento possono quindi essere ottenuti soltanto tramite una parzializzazione della

superficie riflettente della parabola, per esempio coprendo una parte degli spicchi di cui è composta la superficie riflettente con un materiale ad alto assorbimento della radiazione solare.

Figura 2.15 *porzione del braccio di sostegno del ricevitore priva di ingombri utilizzabile per il montaggio della piastra.*

3. Modellazione del sensore per la verifica dell'irraggiamento

Completata la simulazione riguardante i valori di irraggiamento al variare della distanza dal fuoco del ricevitore, è necessaria una verifica sperimentale di questi valori tramite un sensore. Infatti, lo studio ad invecchiamento accelerato necessita di una misurazione priva di errori della quantità di energia incidente sulla piastra, che può essere ricavata solo conoscendo il rapporto di concentrazione esatto. La simulazione è stata condotta effettuando un'importante semplificazione geometrica, per non appesantire ulteriormente la complessità computazionale della simulazione. Infatti, non è stato implementato il braccio di sostegno del ricettore che potrebbe oscurare in parte la radiazione riflessa dalla parabola. Inoltre, sono possibili errori ed imperfezioni del modello teorico dovuti alla mancata conoscenza di alcuni parametri reali, quali per esempio lo sporcamento della superficie della parabola. Per questo motivo, come viene mostrato in questo capitolo, è stata ricercata senza successo la modellazione di un dispositivo sperimentale per la misura della radiazione, successivamente si è optato per l'acquisto di un sensore apposito. La modellazione del primo e secondo sensore (sensore I, sensore II) prevede di esporre un materiale assorbente alla radiazione solare, e poi calcolare l'irraggiamento tramite un bilancio attraverso le perdite termiche. Il sensore III sfrutta invece due materiali differenti, uno ad alto ed uno a basso assorbimento della radiazione solare, per poi ricavare l'irraggiamento attraverso un calcolo differenziale delle dispersioni termiche.

3.1 Sensore I di irraggiamento solare concentrato

La ricerca di un sensore in grado di misurare la radiazione solare incidente su una superficie è stata resa necessaria dal momento che i principali sensori comunemente reperibili atti a questi scopi, come le fotoresistenze o i fotodiodi, non sono progettati per la lettura di valori di irraggiamento elevati e con funzionamento affidabile per lungo tempo in campo aperto, sostenendo valori limite di irraggiamento specifico dell'ordine di 1000 W/m^2.

Il metodo di misurazione ricercato, si fonda sulle proprietà del Tinox, un materiale prodotto dalla ditta Almeco[23]. Solitamente impiegato per applicazioni sul solare termico, il Tinox si presenta sotto forma di fogli di alluminio rivestiti da uno strato ad elevato coefficiente di assorbimento della

[23] http://www.almecogroup.com/it/pagina/53-tinox-energy-cu

radiazione solare, e bassa emissività nel campo dell'infrarosso, per minimizzare le perdite per irraggiamento. Queste caratteristiche sono rappresentate nel grafico seguente (fig. 3.1), ricavato dalla documentazione tecnica del materiale stesso.

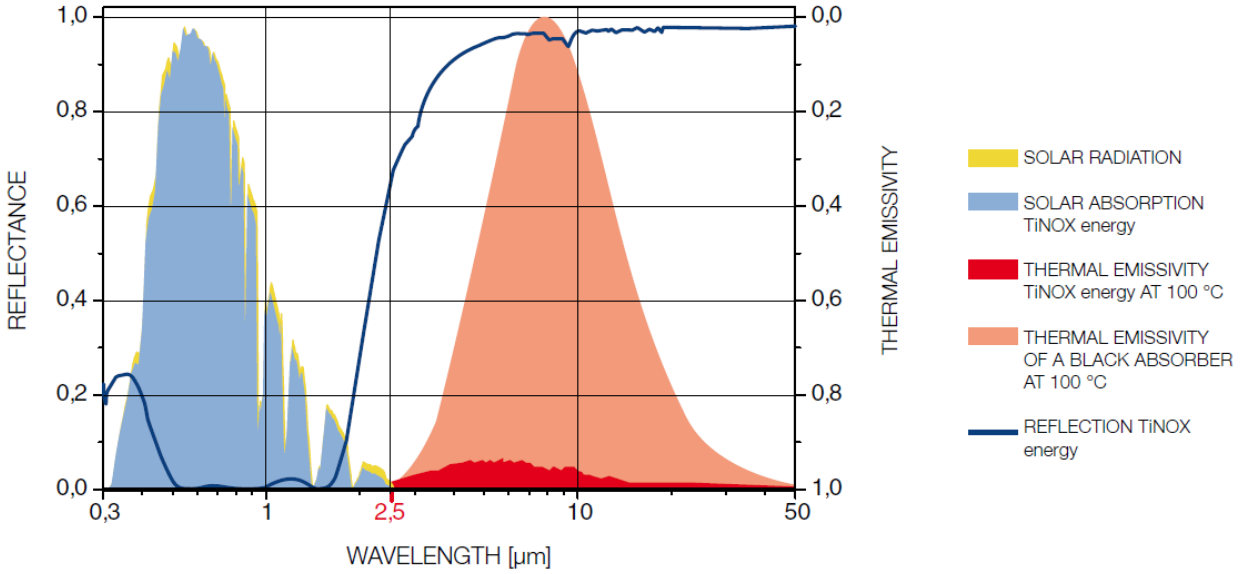


Figura 3.1 *Spettro di emissione ed assorbimento del materiale Tinox. Figura ri-adattata dalla scheda tecnica del materiale.*

L'idea è quella di misurare la differenza di temperatura raggiunta da un campione di questo materiale sottoposto a radiazione solare nota con l'ambiente esterno, e successivamente di calcolarne le perdite di calore per convezione e irraggiamento. La base della piastra è annegata all'interno di un blocco di materiale isolante, per annullarne le perdite per conduzione e irraggiamento nella parte inferiore. Con un semplice bilancio termico sarebbe quindi possibile ricavare il calore entrante nel sistema, e di conseguenza la radiazione solare incidente.

Le caratteristiche del sistema sono le seguenti:

- Dimesioni della lastra in Tinox: 10cm × 10cm;
- Coefficiente di assorbimento della radiazione solare α_s = 95%;
- Emissività termica ε_{th}= 4%;
- Conducibilità termica della lastra = conducibilità termica dell'alluminio = λ= 220 W/(m K).

Le equazioni che regolano lo scambio termico sono le seguenti, e valgono per le condizioni di equilibrio termico:

$$\Phi_{in} = I_{sun}\, \alpha_s\, A \tag{3.1}$$

$$\Phi_{out,tot} = \frac{\sigma\,(T^4 - T_{amb}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{th}} + \frac{1}{\varepsilon_{amb}} - 1}\,A + h\,A\,(T - T_{amb}) \tag{3.2}$$

Dove Φ_{in} è il calore entrante nel sistema, $\Phi_{tot,out}$ è il calore dissipato, A è la superficie ricevente (100 cm^2) e σ è la costante di Boltzmann. Le temperature della piastra e dell'ambiente vengono misurate, mentre il coefficiente di convezione può essere ricavato tramite una correlazione empirica di un flusso parallelo ad una superficie piana (mostrata in seguito), conoscendo il valore della velocità del vento. Una volta calcolato il calore dissipato tramite la seconda equazione, si può ricavare la radiazione solare incidente sulla superficie.

Una prima simulazione termica per verificare questa configurazione è condotta tramite il software Comsol. Sono imposte le seguenti condizioni al contorno:

- Coefficiente di scambio termico convettivo h = 20 W/(m^2 K);
- Temperatura dell'ambiente esterno T_{amb} = 20°C;
- Base inferiore della piastra a contatto con il materiale isolante (0,033 W/(m K);
- Emissività dell'ambiente in cui viene effettuata la simulazione: ε_{amb}= 0,1;
- Irraggiamento incidente sulla superficie: I_{sun} =1800 W/m^2.

La soluzione è rappresentata in figura 3.2.

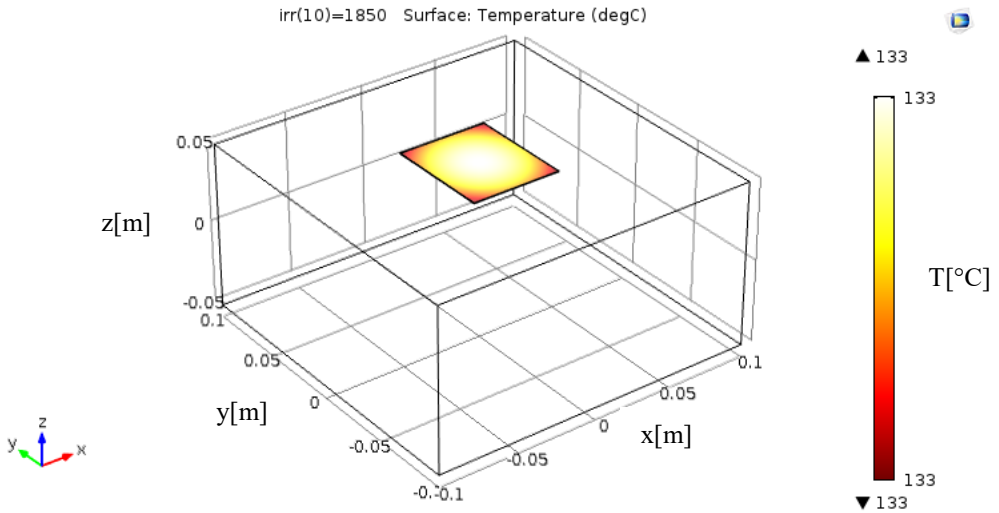


Figura 3.2 *Temperatura ricavata tramite la simulazione termica.*

Dalla temperatura media ricavata dalla simulazione, grazie alle equazioni 3.1 e 3.2 si ripuò risalire ad un irraggiamento specifico incidente di 1819,2 W/m^2, coerente con la condizione al contorno iniziale di 1800 W/m^2.

Per validare sperimentalmente il modello, viene utilizzato il Simulatore Solare presente in laboratorio. Questo macchinario è in grado di emettere una radiazione elettromagnetica con spettro

simile a quello solare, e garantisce un irraggiamento specifico che può variare da un valore minimo di circa 1000 W/m^2 ad un massimo 1820 W/m^2 all'interno di un'apposita camera, su una superficie ad una distanza intermedia dalla lampada che emette la radiazione. Sono presenti anche delle ventole di raffreddamento per cui è prevista una regolazione, ai fini di questa simulazione sono impostate al valore massimo per avere un valore costante di scambio termico convettivo.

Figura 3.3 *Sun Simulator.*

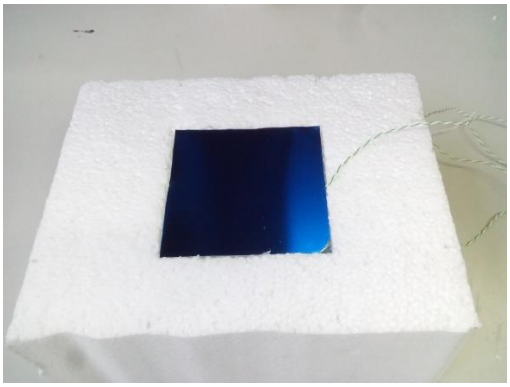


Figura 3.4 *Sistema reale.*

La simulazione viene svolta inserendo all'interno del Simulatore Solare la lastra di Tinox isolata nella parte inferiore e provvista di una termocoppia di tipo K per il monitoraggio della temperatura. Altre due termocoppie sono inserite nel simulatore, una a contatto con le pareti e una libera, per misurare rispettivamente la temperatura delle pareti e la temperatura ambiente. Le misurazioni sono effettuate per undici valori diversi di regolazione dell'irraggiamento, e l'acquisizione è avvenuta eliminando i valori ottenuti durante transitorio. La misura del coefficiente convettivo è calcolata a partire dal valore di velocità dell'aria in prossimità della superficie di Tinox, misurata grazie ad un anemometro. Le equazioni utilizzate per determinare il coefficiente convettivo sono le seguenti[24]:

$$Nu = 0{,}664\, Re^{\frac{1}{2}}\, Pr^{\frac{1}{3}} \tag{3.3}$$

$$Nu = \frac{h\, D}{k} \tag{3.4}$$

Essendo la velocità del vento misurata pari a 0,7 m/s, risulta un coefficiente di convezione pari a 10,2 W/(m^2 K).

Attraverso le formule di bilancio termico mostrate in precedenza, e con i parametri rilevati, si ottiene il risultato seguente (fig. 3.5).

[24] Incropera Frank P., DeWitt David P., Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S., Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition, pagina 423.

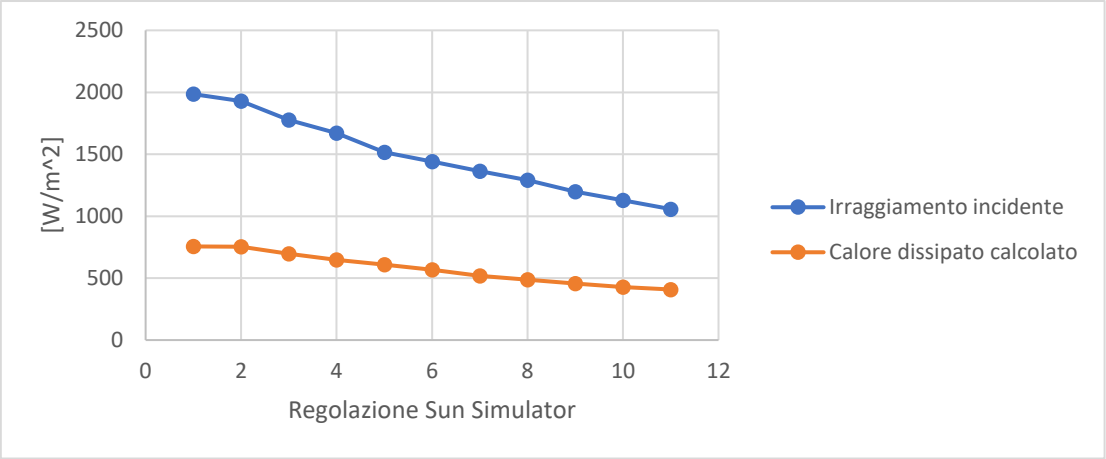


Figura 3.5 *Confronto tra l'irraggiamento incidente e il calore disperso calcolato con h= 10,2 [W/(m²K)]. È evidente la discrepanza.*

Nonostante l'andamento dell'irraggiamento rispecchi quello dell'irraggiamento incidente, i valori calcolati di calore dissipato sono inferiori di oltre il 50% rispetto a quelli dell'irraggiamento incidente. Ciò può essere dovuto alla difficoltà di valutare l'effettiva velocità dell'aria sulla superficie, e di conseguenza del coefficiente convettivo. Inoltre, possono essere presenti delle dissipazioni di calore anche nella parte inferiore ed esterna della piastra, nonostante sia stata isolata termicamente. Il termine di calore emesso per radiazione non è molto influente sul risultato, in quanto sia la piastra che le pareti in alluminio sono caratterizzate da un'emisssività termica molto bassa.

Nonostante questa configurazione del sensore sia stata abbandonata a causa dei problemi descritti, viene verificato per iterazioni successive che il coefficiente di convezione che dovrebbe assumere il sistema per ottenere un andamento di calore dissipato coincidente con quello fornito è di 27,8 W/(m^2 K), valore più che doppio rispetto a quello calcolato tramite le correlazioni.

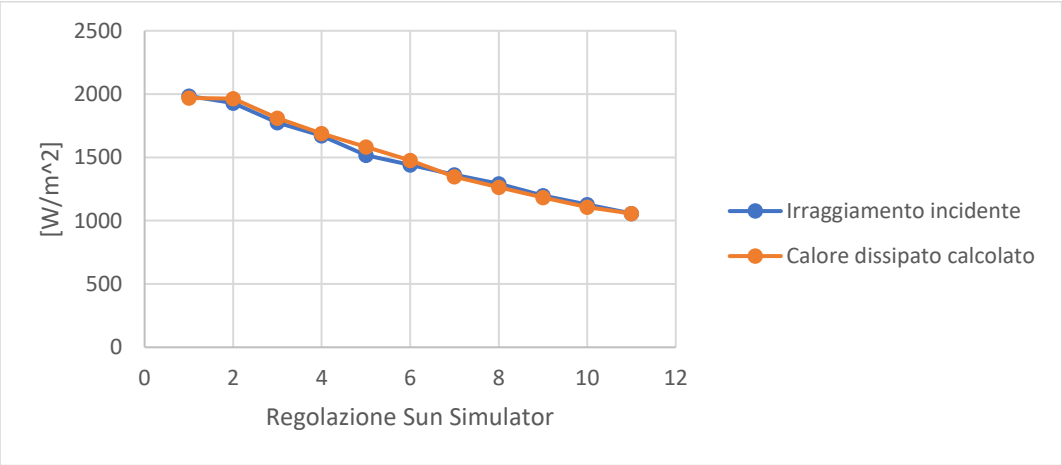


Figura 3.6 *Confronto tra l'irraggiamento incidente e il calore disperso calcolato con h= 10,2 [W/(m²K)].*

3.2 Sensore II di irraggiamento solare concentrato

Visti i problemi nel determinare il coefficiente convettivo, si è pensato ad un'ulteriore configurazione che consenta di eliminare dalle equazioni per determinare l'irraggiamento incidente il termine di calore dissipato per convezione. Ciò è possibile se si ricopre la lastra di Tinox con un materiale avente un alto coefficiente di trasmissione della radiazione solare, come il vetro borosilicato. In questo modo è possibile misurare il calore dissipato totale come differenza tra la temperatura del Tinox e quella della superficie esterna del vetro, conoscendo il coefficiente di conducibilità termica del vetro. Le proprietà ottiche del vetro borosilicato sono mostrate nello schema (fig. 3.7) fornito dal produttore Schott[25] per il suo prodotto Borofloat.

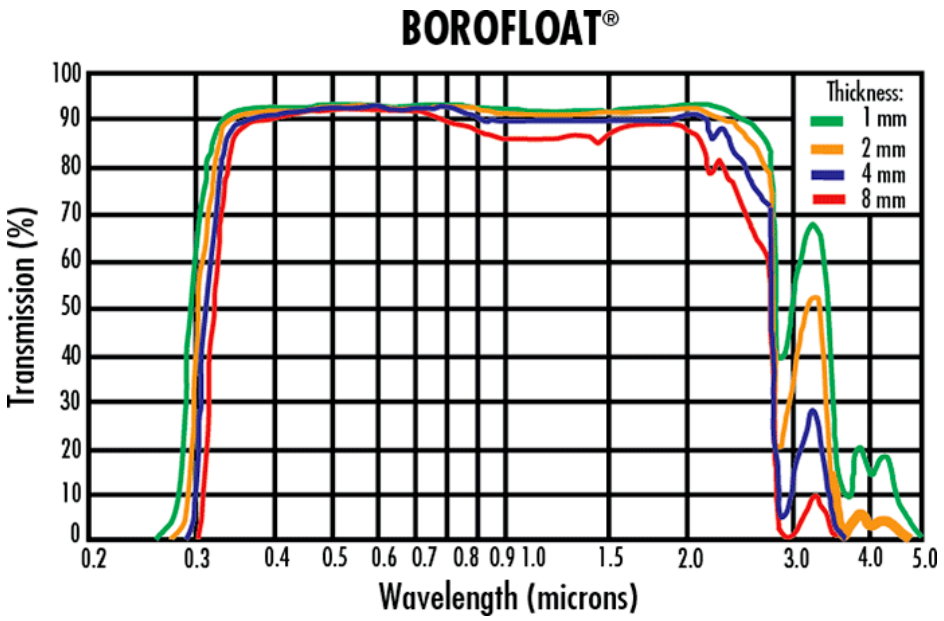


Figura 3.7 *Curva di trasmissione della radiazione solare del vetro Borofloat. Figura ri-adattata dalla scheda tecnica del materiale.*

Come è possibile notare, il Borofloat presenta un alto coefficiente di trasmissione per le lunghezze d'onda caratteristiche della luce visibile (τ_v= 90%), mentre assume un valore praticamente nullo per emissioni nel campo dell'infrarosso, schermando così quasi del tutto la radiazione emessa dal Tinox. Tuttavia, non è più trascurabile il calore emesso per irraggiamento dalla superficie esterna del vetro, dato l'alta emissività di questo materiale (ε_v= 0,93 circa).

Uno schema della configurazione pensata è visibile in figura 3.8, le termocoppie misurano la temperatura del Tinox e quelle superficiali del vetro.

[25] https://www.schott.com/borofloat/english/index.html

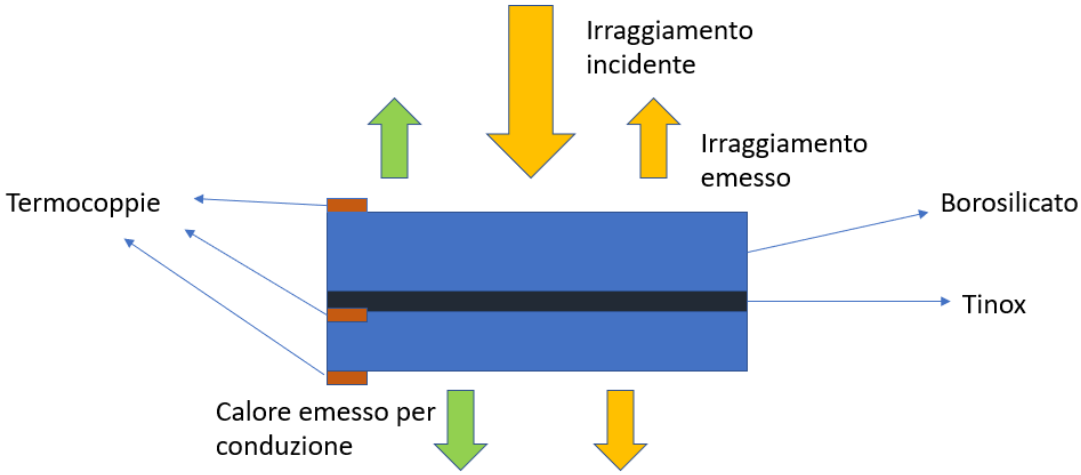


Figura 3.8 *Bilancio dei flussi di calore sul dispositivo.*

Nel caso stazionario e unidimensionale (si trascurano le perdite laterali), le equazioni che descrivono il calore entrante e uscente nel sistema sono le seguenti:

$$\Phi_{in} = I_{sun}\, \alpha_t\, \tau_v A \tag{3.5}$$

$$\Phi_{out,cond} = \frac{\lambda_v}{\delta_v}\left(T_t - T_{v,1}\right) A + \frac{\lambda_v}{\delta_v}\left(T_t - T_{v,2}\right) A \tag{3.6}$$

$$\Phi_{out,rad} = \frac{\sigma\left(T_{v,1}^4 - T_{amb}^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{amb}} - 1} A + \frac{\sigma\left(T_{v,2}^4 - T_{amb}^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{amb}} - 1} A \tag{3.7}$$

$$\Phi_{out,tot} = \Phi_{out,cond} + \Phi_{out,rad} \tag{3.8}$$

Dove Φ_{in} e $\Phi_{out,tot}$ sono rispettivamente le quantità di calore entrante e uscente nel sistema. $\Phi_{out,tot}$ è composto dalla somma del calore uscente per conduzione ($\Phi_{out,cond}$) e del calore uscente per irraggiamento ($\Phi_{out,rad}$). I_{sun} definisce il valore di irraggiamento fornito dal Simulatore Solare, mentre A (37,5 cm^2) è la superficie esposta alla radiazione. T_t, $T_{v,1}$ e $T_{v,2}$ sono le temperature misurate dalle termocoppie rispettivamente per il Tinox, la superfice superiore del vetro e la superficie inferiore del vetro. La conducibilità del vetro, fornita nella documentazione tecnica del materiale, vale λ_v = 1,2 W/(m K). Nel modello è trascurato per ipotesi la quota di irraggiamento assorbita dal vetro.

Le dimensioni del sistema sono le seguenti:

- Dimensioni dei pannelli in vetro: 7,5 × 5,5 cm;

- Spessore dei pannelli in vetro: δ_v= 6 mm;
- Dimensioni della lastra in Tinox: 7,2 × 5,2 cm.

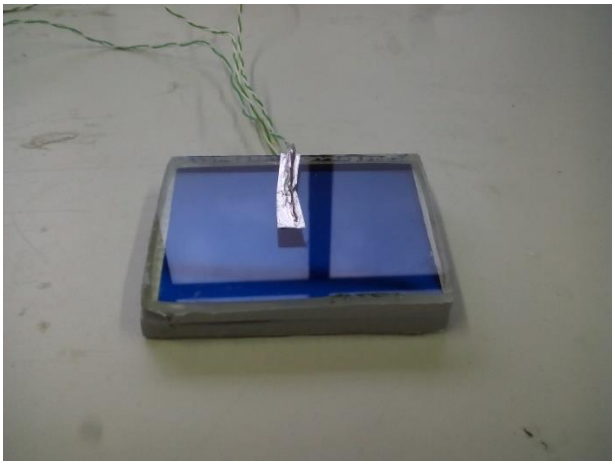


Figura 3.9 *Dispositivo senza staffa*

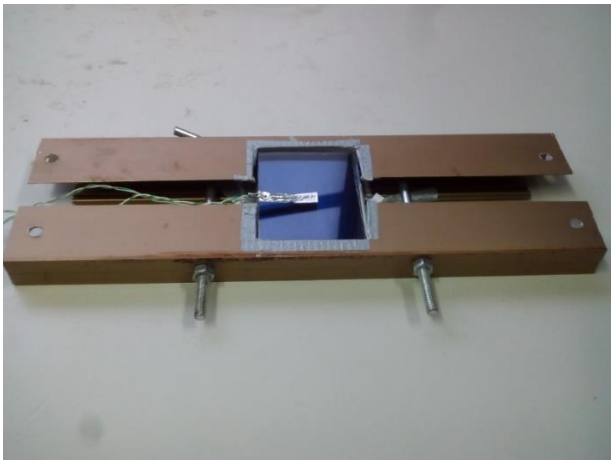


Figura 3.10 *Dispositivo con staffa*

Nella costruzione del sistema, le termocoppie di tipo K sono fissate al vetro e al Tinox con della pasta termica ed un nastro isolante riflettente. Il nastro riflettente ha il compito di schermare nella parte di misura la radiazione solare, per evitare un surriscaldamento anomalo della termocoppia. Il sistema viene inoltre dotato di una staffa in alluminio per il futuro fissaggio sul concentratore solare, come nella foto (fig. 3.10).

Analogamente a quanto effettuato per la modellazione del primo sensore, il sistema viene testato nel Simulatore Solare, con una regolazione della potenza di irraggiamento pari a quella massima (1820 W/m^2). Tuttavia, non vengono raggiunti risultati significativi. Per come è stata impostata la modellazione teorica infatti, la temperatura centrale del Tinox dovrebbe essere la più elevata, per misurare una dissipazione di calore positiva verso l'esterno del sistema. La temperatura maggiore misurata risulta invece quella superiore, con un valore di 93°C. La temperatura centrale vale invece 89°C e quella inferiore 81°C. Ciò probabilmente potrebbe essere dovuto agli apporti di calore derivanti dall'assorbimento di radiazione della staffa in alluminio.

Pertanto, viene effettuata un'ulteriore prova senza la staffa. I risultati delle temperature del Tinox e delle due superfici del vetro, mantenendo invariate le condizioni di irraggiamento, valgono rispettivamente 88°C, 83°C e 76°C. La temperatura ambiente misurata è di 55 °C. Secondo il modello matematico descritto, la quantità di calore entrante nel sistema risulta essere di 5,8 W totali, mentre il calore dissipato di 12,7 W. Anche in questo caso è evidente una grossa discrepanza tra i due valori. Ciò può essere dovuto alla scarsa coerenza del modello unidimensionale matematico confrontata con il sistema reale. Il calore dissipato dai bordi esterni del sistema potrebbe infatti non essere trascurabile. Questa ipotesi è verificata da una simulazione tramite

Comsol, dove si può notare nella soluzione una distribuzione poco omogenea della temperatura lungo la superficie del vetro (fig.3.11).

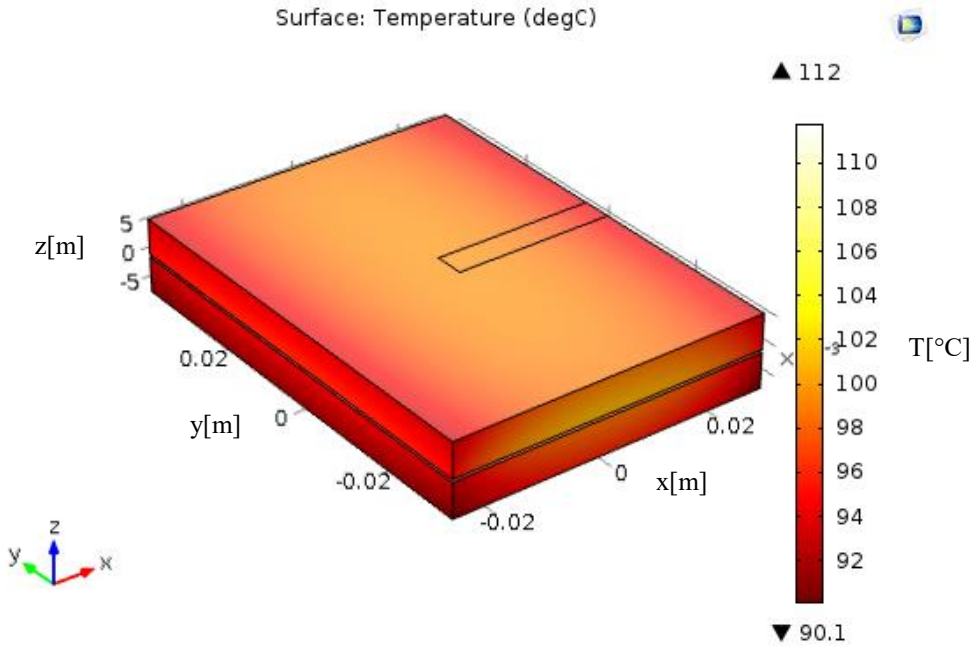


Figura 3.11 Distribuzione della temperatura simulata.

3.3 Sensore III di irraggiamento solare concentrato

Un'ulteriore configurazione di un sensore di misura che permetterebbe di svincolarsi dal termine convettivo, consiste nell'implementazione di una prova differenziale, utilizzando due materiali con un coefficiente di assorbimento della radiazione solare differente, come per esempio il Tinox (α = 0,95) e il Miro Sun (α = 0,1).

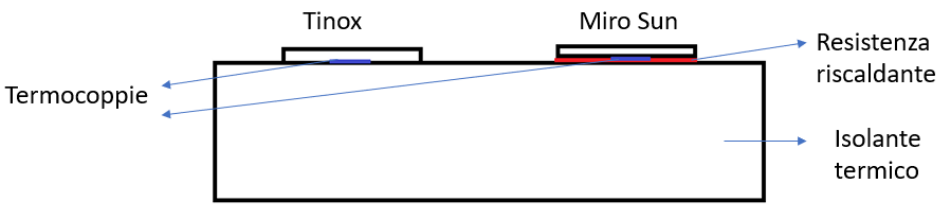


Figura 3.12 Struttura del sensore III

Esponendo i due campioni di materiale differente, ma con uguale dimensione, alle medesime condizioni di irraggiamento, il materiale con il coefficiente di assorbimento maggiore tenderebbe ad assumere una temperatura più alta. Riscaldando quindi il secondo campione tramite una resistenza elettrica, in modo da mantenerlo alla stessa temperatura del primo, è possibile ricavare il valore di irraggiamento incidente conoscendo il valore del calore fornito. Di seguito è mostrato il sistema di equazioni di bilancio termico:

$$\begin{cases} A\,I\,\alpha_1 - \dfrac{A}{R}\,(T - T_{amb}) - \sigma\,\varepsilon_1\,(T^4 - T_{amb}^4) = 0 \\ A\,I\,\alpha_2 - \dfrac{A}{R}\,(T - T_{amb}) - \sigma\,\varepsilon_2\,(T^4 - T_{amb}^4) + \dfrac{Q}{A} = 0 \end{cases} \tag{3.9}$$

Dove R è il valore di resistenza termica totale, identico per i due campioni sottoposti alle stesse condizioni di scambio termico per convezione. T è la temperatura raggiunta dai due campioni, anch'essa uguale grazie al contributo di calore fornito dalla resistenza al campione avente l'assorbimento minore. Risolvendo il sistema è possibile ricavare il valore dell'unica incognita I:

$$I = \frac{Q}{A\,(\alpha_1 - \alpha_2)} + \sigma\,\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{(\alpha_1 - \alpha_2)}\,(T^4 - T_{amb}^4) \tag{3.10}$$

La difficoltà di un sistema simile risiede nell'implementazione del sistema di regolazione del calore fornito tramite la resistenza termica. A seconda delle condizioni di irraggiamento e di convezione, la temperatura potrebbe subire grandi variazioni in tempi brevi, richiedendo una risposta molto veloce del sistema.

3.4 Selezione del sensore per la misura dell'irraggiamento

Per la verifica sperimentale dei valori di irraggiamento concentrato sul ricevitore si è scelto il dispositivo di codice SBG01 della ditta olandese Hukseflux[26].

Figura 3.13 *Sensore. Figura ri-adattata dalla referenza*[27]

[26] https://www.hukseflux.com/
[27] Ivi.

Il funzionamento di questo dispositivo si fonda sul principio fisico descritto nella sezione 3.1 per la modellazione di un sensore con una lastra di Tinox. Infatti, l'area sensibile è ricoperta anch'essa da una speciale vernice ad alto assorbimento su un ampio spettro (da 0,2 ad oltre 50 μm). La radiazione assorbita viene quindi convertita in energia termica, che è a sua volta convertita in un segnale elettrico da una termopila, sensore di misura composto da più termocoppie connesse in serie. Il calore viene poi trasmesso al corpo di metallo del sensore, che è mantenuto ad una bassa temperatura tramite un sistema di raffreddamento ad acqua, per evitare il surriscaldamento del sensore. Il raffreddamento ad acqua e i materiali utilizzati rendono questo dispositivo adatto per la misurazione di irraggiamenti anche molto elevati, fino a i 200 kW/m^2. Come indicato dal produttore, il dispositivo è in grado di captare la radiazione incidente con un'angolazione di 180°, con una sensibilità inferiore per la radiazione incidente ad angolazioni non incidenti ortogonalmente sul sensore, proporzionalmente al coseno dell'angolo di incidenza. Tuttavia, questa implicazione non è limitante per l'applicazione sul concentratore solare, in quanto la misura di irraggiamento specifico cercata non è da riferirsi alla sorgente, bensì all'area del ricettore.

L'equazione fornita dal produttore per la misura dell'irraggiamento è la seguente:

$$\Phi = \frac{U}{S} \tag{3.11}$$

Dove Φ rappresenta il valore di irraggiamento cercato [W/m^2], U è il valore del segnale in uscita del sensore misurato in Volt, infine S indica la sensibilità dello strumento dichiarata da produttore attraverso un test di calibrazione [V/(W/m^2)]. Quest'ultimo parametro varia a seconda del range di sensibilità desiderato per valori compresi tra 0,1 e 0,7 × 10^{-6} V/(W/m^2).

Per questi valori è necessario un componente di amplificazione del segnale: per l'applicazione sul concentratore solare verrà utilizzata una scheda del tipo NI 9211 della National Instruments[28], opportunamente configurata.

Le caratteristiche del sensore dichiarate sono le seguenti:

- Range di sensibilità: 0- 20 kW/m^2;
- Tempo di risposta (65%): <0,45s;
- Peso netto incluso il cavo di acquisizione da 2 m: 300 g;
- Diametro dell'area attiva del sensore: 10 mm;
- Portata dell'acqua di raffreddamento: >10 l/h.

[28] http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/it/nid/209887.

Sono inoltre richieste al produttore alcune caratteristiche aggiuntive per adattare il sensore a questa applicazione:

- Range di sensibilità: 0- 20 kW/m^2;
- Uno speciale rivestimento impermeabile della superficie attiva del sensore per renderlo adatto all'utilizzo in ambiente esterno;
- Lunghezza del cavo di acquisizione pari a 5 m per garantire un adeguato spazio di manovra;
- Una termocoppia di tipo K connessa allo strumento per monitorare la temperatura.

Dal momento che il produttore indica la necessità di un raffreddamento attivo per concentrazioni superiori ad 1 kW/m^2 oppure per tempi di esposizioni superiori ad 1s (entrambe le condizioni sono verificate per l'acquisizione sul concentratore solare), è necessario connettere il sensore ad un refrigeratore o direttamente alla rete idrica.

Dal momento che, a causa della posizione del concentratore, il collegamento alla rete idrica potrebbe risultare difficoltoso, si è pensato che una buona soluzione possa essere *l'Industrial Chiller CW-3000* (fig. 3.14).

Figura 3.14 *Cooler.*

Pur non avendo un ciclo refrigerante interno, ma soltanto delle ventole di raffreddamento, il produttore dichiara una potenza di raffreddamento pari a 50 W/°C, ed un valore di *pump lifting* pari a 10m, entrambi i valori più che sufficienti per questa applicazione. Infatti, l'ordine di grandezza del calore da dissipare è 100 W, il quale comporterebbe un incremento di temperatura di un paio di gradi (valore accettabile). L'altezza raggiunta dal dissipatore rispetto al piano su cui è posto il refrigeratore invece è di 2- 3 m circa, al quale vanno sommate le perdite di carico, comunque minime a causa della lunghezza limitata del circuito e dell'assenza di strozzature.

3.5 Modellazione della struttura di sostegno

Per l'acquisizione dei valori di irraggiamento, il sensore deve essere fissato sul concentratore ad una distanza dal fuoco pari a quella simulata in Comsol, e la superficie attiva del sensore deve essere mantenuta perpendicolare alla direzione dei raggi. Per questo motivo è necessaria la modellazione di una struttura di sostegno che andrà fissata al braccio di sostegno del ricevitore già presente sul concentratore, avente sezione quadrata con dimensione del lato di 10 cm.

Si è pensato di dividere la struttura in due componenti distinti:

- Una staffa con una parte serrante per il fissaggio al braccio del concentratore, che verrà utilizzata anche per l'installazione delle celle solari;
- Una piastra che funge da connessione tra la staffa ed il sensore.

Di seguito vengono mostrati i modelli creati tramite il software SolidWorks. Le parti descritte sono da realizzarsi in materiali resistenti alle alte temperature (come acciaio o alluminio), per evitare possibili inconvenienti dovuti alla deviazione di radiazione solare concentrata verso la piastra o verso la staffa.

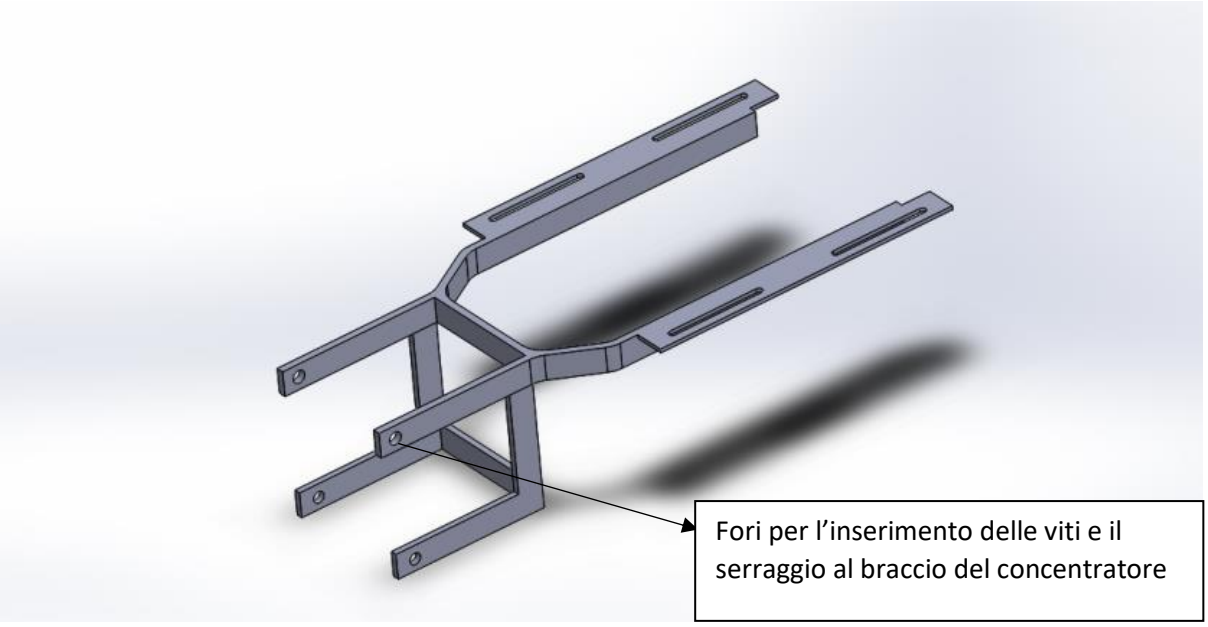


Figura 3.15 *Staffa serrante.*

La parte di ancoraggio al braccio del concentratore è sostenuta da due viti con due punti di serraggio differenti, per evitare la possibile flessione della struttura dovuta al peso del sistema.

Il disegno seguente mostra la vista superiore, frontale e laterale della staffa, con le relative quote in millimetri.

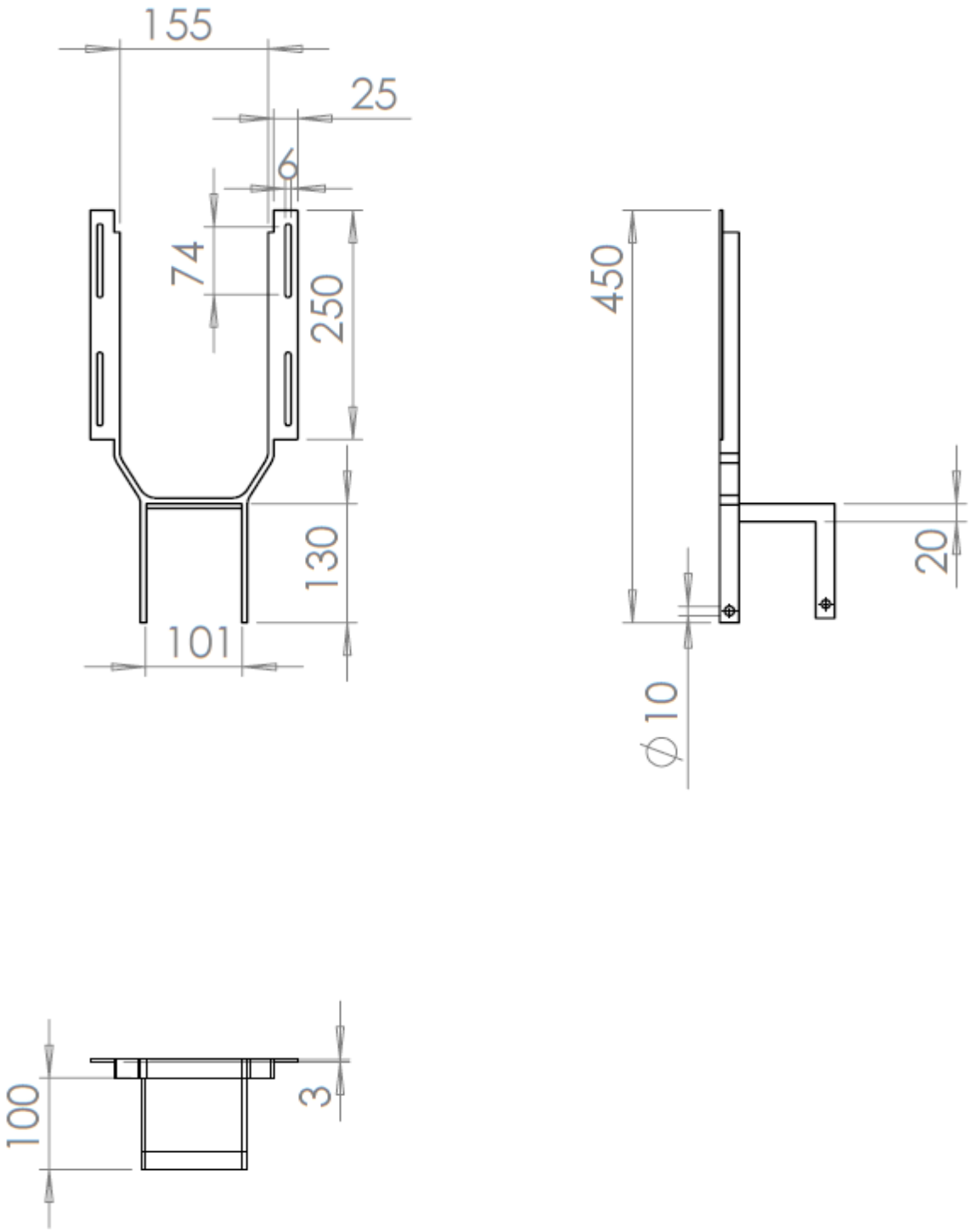
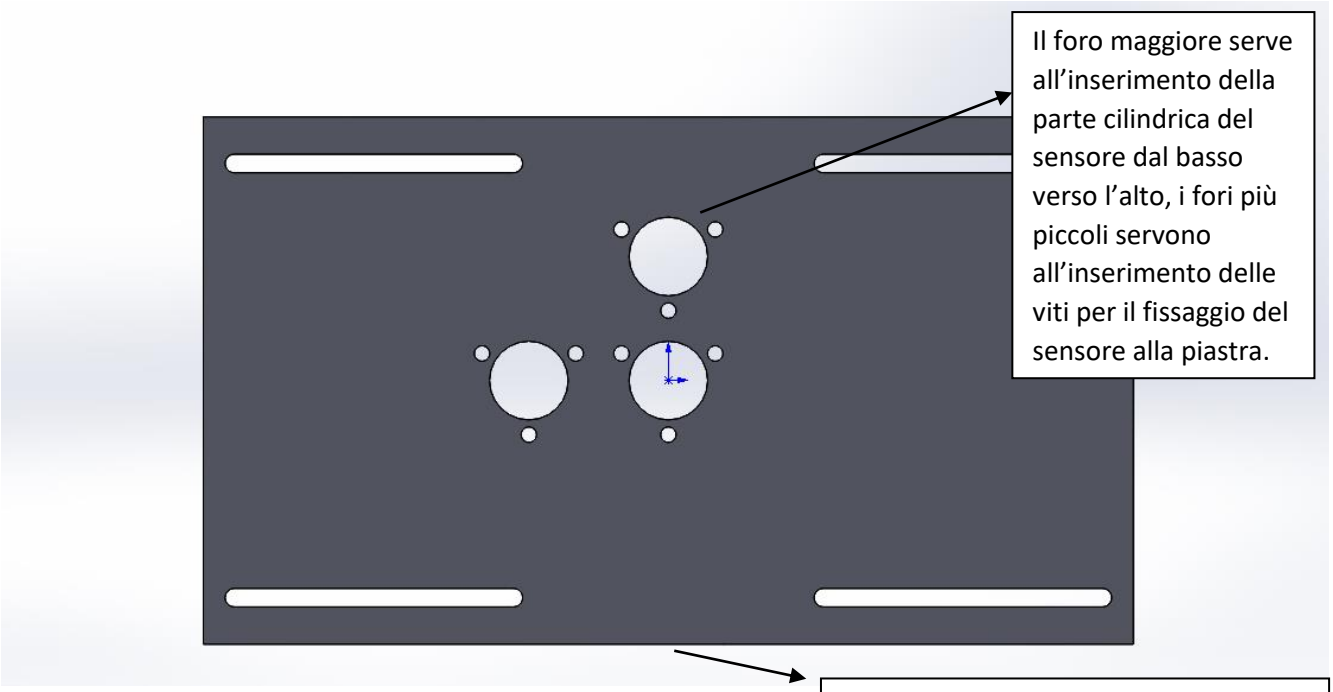


Figura 3.16 *Disegno con quote in millimetri.*



Le dimensioni della piastra sono 200 × 300 × 1,2 mm, ed offre una resistenza meccanica adeguata al peso che deve sostenere

Figura 3.17 *Piastra.*

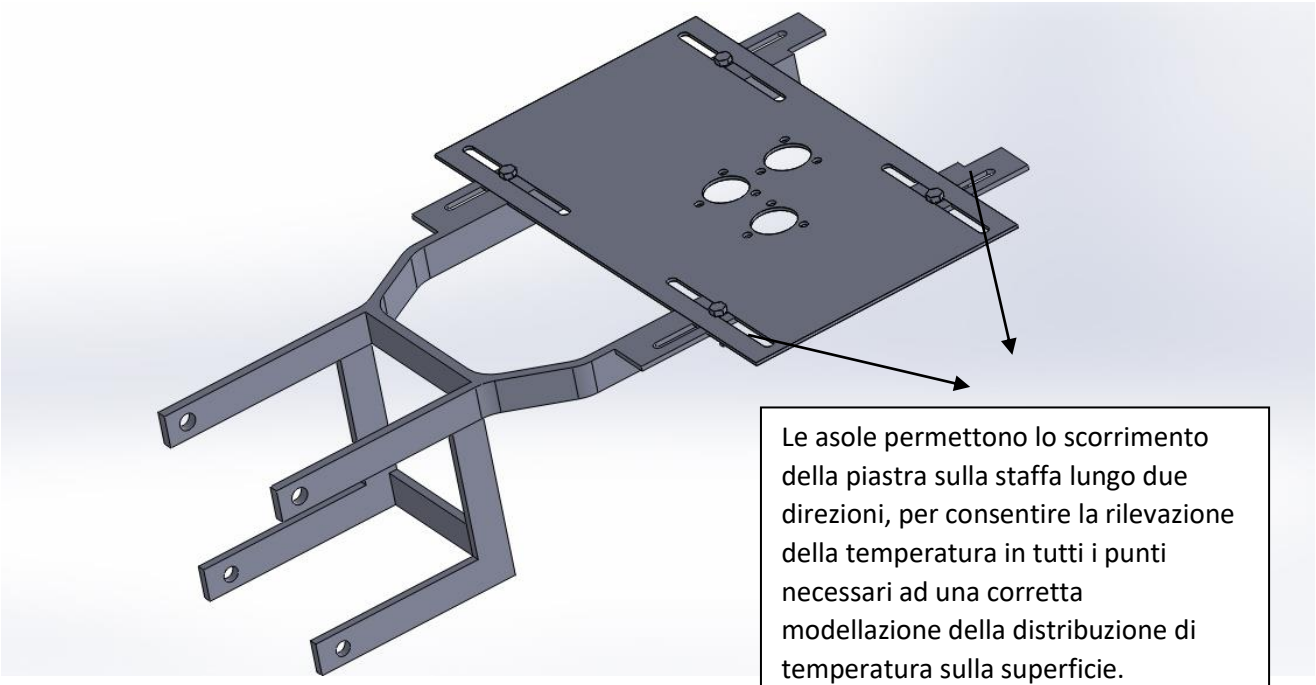


Figura 3.18 *Assemblato.*

4. Analisi termica del dispositivo

Durante la conduzione del test di invecchiamento accelerato, la temperatura delle celle solari a Perovskite deve sempre rimanere ad una temperatura inferiore ai 70 °C, pena il deterioramento delle celle. Risulta pertanto fondamentale implementare una configurazione del sistema che garantisca una dissipazione del calore adeguata.

Occorre dimensionare lo scambio termico per le peggiori condizioni ambientali possibili, ovvero per un valore massimo di irraggiamento incidente sul piano delle celle solari e per l'assenza di vento. Per la prima condizione, si è ipotizzato di installare la piastra ad una distanza dal fuoco tale per cui il fattore di concentrazione sia pari a 10 (si vedano i risultati della simulazione ottica). I valori di irraggiamento normale diretto -forniti da PVgis[29]- indicano che per la città di Torino non venga superato il valore di 1000 W/m^2, assunto come valore massimo (si noti che ai fini di questa applicazione, all'irraggiamento solare globale è da sottrarre l'irraggiamento diffuso). L'irraggiamento concentrato incidente sulla piastra ricevente risulta pertanto pari a 10 × 1 kW/m^2 = 10 kW/m^2, valore di riferimento utilizzato per tutti i bilanci termici effettuati in questo capitolo.

L'ipotesi dell'assenza di vento risulta improbabile, data la posizione del concentratore solare ad un'altezza dal suolo di circa 20 m, ma viene assunta in quanto ipotesi conservativa. Pertanto, lo scambio termico viene considerato solamente naturale, con coefficiente di convezione h [W/(m^2 K)] calcolato tramite correlazione. È innanzitutto necessario il calcolo del numero adimensionato di Rayleigh (Ra), che consente uno studio sulle forze di galleggiamento nel fluido considerato (nel caso presente, l'aria):

$$Ra = \frac{g\,\beta\,(T_s - T_a)\,D_{eq}^3}{\nu\,\alpha} \tag{4.1}$$

Dove il diametro equivalente è calcolato come:

$$D_{eq} = \frac{4\,S}{P} \tag{4.2}$$

Dove S è la superficie della piastra esposta alla convezione e P è il perimetro. Per le dimensioni della piastra progettata per il sostegno delle celle solari (20 × 25 cm), D_{eq}= 22 cm. Inoltre, g è la costante di accelerazione gravitazionale, T_s è la temperatura superficiale della piastra (assunta pari a 70 °C) e T_a è la temperatura dell'aria (20 °C). Gli altri termini esprimono le proprietà termofisiche dell'aria ad una temperatura di riferimento di 20 °C:

[29] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php

- Coefficiente volumetrico di dilatazione termica $\beta = 3{,}421 \times 10^{-3}$ [1/K];
- Viscosità cinematica $\nu = 153{,}5 \times 10^{-7}$ [m^2/s];
- Diffusività termica $\alpha = 214{,}7 \times 10^{-7}$ [m^2/s].

Per la scelta della relazione empirica è importante determinare l'orientazione della piastra rispetto alla direzione della gravità. Essendo installata sul concentratore, che cambia orientazione per inseguire il sole, viene ipotizzato che la superficie della piastra su cui sono inserite le celle solari (orientata verso la radiazione riflessa dalla parabola) sia rivolta verso il basso, mentre la parte opposta della piastra sia rivolta verso l'alto. Da questa ipotesi deriva la scelta delle due relazioni empiriche[30] per il calcolo del numero di Nusselt (Nu).

Superficie inferiore piana calda:

$$Nu = 0{,}52\, Ra^{\frac{1}{5}} \tag{4.3}$$

Superficie superiore piana calda:

$$Nu = 0{,}54\, Ra^{\frac{1}{4}} \tag{4.4}$$

Il valore di h è ricavato con la formula:

$$Nu = \frac{h\, D_{eq}}{k} \tag{4.5}$$

Dove k è il valore della conducibilità termica dell'aria ($k = 25{,}69\ 10^{-3}$ [W/(m K)]). I valori risultanti di h sono $h_l = 2{,}14$ [W/(m^2 K)] e $h_u = 7{,}1$ [W/(m^2 K)], i quali indicano il coefficiente convettivo rispettivamente per la parte inferiore e superiore della piastra .

Per un bilancio iniziale del flusso termico del sistema, vengono assunti i seguenti parametri:

- Dimensione della piastra su cui vengono montate le celle solari: 20 × 25 cm;
- Coefficiente di assorbimento della radiazione solare della piastra (alluminio non lucido) $\alpha_{piastra} = 0{,}2$.
- Numero e dimensione delle celle solari: 8 × 1 cm^2, opportunamente distanziate sulla superficie della piastra per disperdere il calore più uniformemente;
- Coefficiente di assorbimento delle celle solari $\alpha_{celle} = 1$ (ipotesi conservativa);
- Irraggiamento incidente concentrato $I_c = 10$ kW/m^2;
- Temperatura della piastra uniforme e pari a $T_s = 70$ °C;
- Temperatura dell'ambiente $T_a = 20$ °C;

Il calore entrante totale nel sistema viene calcolato come:

[30] Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition, Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine.

$$Q_{in} = I_c\, A_{piastra}\alpha_{piastra} + \; I_c\, A_{celle}\alpha_{celle} = 106{,}4\; W \tag{4.6}$$

Il calore dissipato per convezione naturale, trascurando il calore dissipato ai bordi della piastra, risulta invece:

$$Q_{conv} = \; A_{piastra}\, h_l\, (T_s - T_a) + \; A_{piastra}\, h_u\, (T_s - T_a) = 18{,}48\; W \tag{4.7}$$

Ci sono pertanto 106,4- 18,48 = 87,92 W di calore in eccesso, che se non dissipati porterebbero ad un aumento della temperatura della piastra e delle celle solari oltre al limite massimo consentito.

Di seguito sono descritte alcune soluzioni alternative per la dissipazione attiva e passiva del calore in eccesso: per il progetto verrà scelto il sistema di dissipazione passivo, per la maggior semplicità di installazione e una sicurezza sulla continuità di funzionamento che non può essere garantita dai sistemi attivi.

4.1 Dissipazione del calore a fluido

Il primo modello di dissipazione del calore in eccesso prevede di dotare la piastra di un circuito di raffreddamento ad acqua. La piastra, mantenendo invariate le dimensioni di base ad altezza, dovrebbe avere uno spessore maggiore per consentire di inserire al suo interno una serpentina di raffreddamento. Il materiale scelto deve garantire una buona conducibilità termica, come l'alluminio.

Il processo costruttivo prevede quindi la lavorazione di due piastre di circa 1 cm di spessore, eseguendo una scanalatura utile per inserire una serpentina del diametro esterno di 5 mm tra le due piastre, che vengono poi accoppiate con alcune viti e con l'inserimento di uno strato di pasta termica utile per migliorare lo scambio termico.

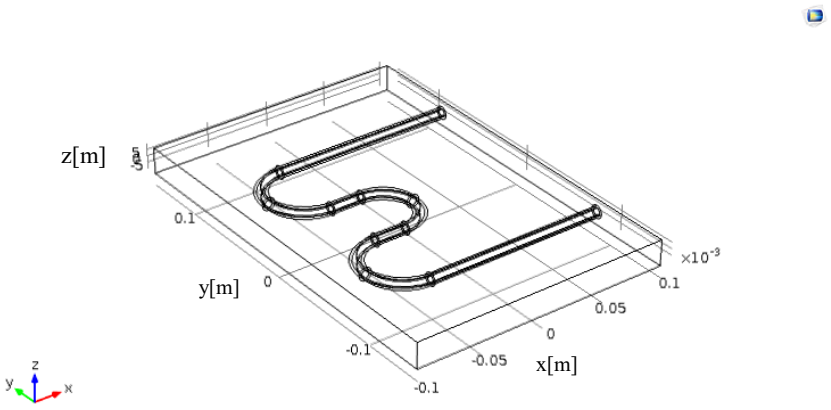


Figura 4.1 *Disegno della piastra con lo scambiatore di calore a fluido.*

Di seguito viene descritto il bilancio termico per verificare l'adeguatezza del sistema di raffreddamento. Il calore in ingresso, ipotizzando che la piastra sia costruita con un materiale non lucido (alluminio o acciaio) avente un coefficiente di assorbimento della radiazione solare pari a $\alpha_{piastra} = 0{,}4$, è pari a:

$$Q_{in} = \Phi_s\, A_{piastra}\alpha_{piastra} + \Phi_s\, A_{celle}\alpha_{celle} = 204{,}8\, W \tag{4.8}$$

Sottraendo il calore dissipato per convezione, lo stesso calcolato precedentemente, il circuito di raffreddamento deve dissipare un calore totale pari a 186,4W. Ipotizzando un salto di temperatura dell'acqua tra ingresso e uscita di 3 °C, la portata minima dell'acqua deve essere di:

$$G_{H_2O} = \frac{Q}{c_p\, \Delta T} = 0{,}015\frac{kg}{s} \tag{4.9}$$

Questo valore di portata, inferiore ad un litro al secondo, può essere facilmente gestito da un *chiller* del tipo utilizzato per il raffreddamento del sensore di irraggiamento descritto in precedenza.

Il vantaggio di questo sistema consiste in un'ottima capacità di dissipazione del calore. Tuttavia, non risulta di facile applicazione, in quanto l'acqua deve essere fornita alla serpentina attraverso dei tubi. Essendo la piastra montata sul braccio del concentratore solare, in movimento sia nelle fasi di messa in funzione e spegnimento, sia nel corso della giornata per l'inseguimento del sole, i tubi sarebbero sottoposti a movimentazioni meccaniche e trazioni. Se ciò non rappresenta un grosso problema per il raffreddamento del sensore di irraggiamento, il cui funzionamento avviene solo saltuariamente e sotto una costante supervisione, questa condizione potrebbe non garantire la dovuta affidabilità per il test di invecchiamento. Infatti, nel corso del tempo, potrebbe sopraggiungere una rottura del circuito con conseguente surriscaldamento indesiderato delle celle solari oltre al valore di soglia.

4.2 Dissipazione del calore per convezione forzata

Un secondo modello per la dissipazione del calore in eccesso prevede l'utilizzo di una ventola di raffreddamento accoppiata con un dissipatore alettato, da applicare alla parte inferiore della piastra. Lavorando in condizione di ambiente esterno, è necessario l'utilizzo di un dispositivo con un'alta resistenza all'acqua e alla polvere (livello di protezione minima richiesto IP 56). Il sistema

ventola/dissipatore di Thermo Electric Devices[31], di codice TDEX3132/100 e dimensioni 100 × 101,6 × 77 mm, dichiara una resistenza termica di 0,16 K/W.

Figura 4.2 *Ventola di raffreddamento accoppiata al dissipatore.*

Mantenendo i dati della piastra descritti nella parte di dissipazione del calore per convezione naturale ($\alpha_{piastra}$ = 0,2, dimensioni 200 × 250 × 1,2 mm), il calore da dissipare affidato alla ventola è il medesimo (87,92 W). Dall'equazione seguente è possibile ricavare il salto di temperatura minimo piastra/ dissipatore necessario per dissipare il calore entrante:

$$\Delta T = R_{th}\, Q = 14\ °C \tag{4.10}$$

Ipotizzando la temperatura dell'ambiente esterno sempre inferiore ai 30 °C e la temperatura della piastra omogenea (ipotesi verosimile dato l'esiguo spessore della piastra), il salto di temperatura massimo ammissibile risulta pari a 40°C (la piastra deve mantenersi ad una temperatura inferiore ai 70°C). Pertanto, il calore asportato dal dissipatore è più che sufficiente a mantenere le celle al di sotto della temperatura massima consentita.

Tuttavia, anche in questo caso il punto debole della soluzione risiede nella scarsa affidabilità del dissipatore che, sottoposto alle condizioni dell'ambiente esterno, potrebbe interrompere il funzionamento durante le prove prolungate.

4.3 Dissipazione passiva del calore

Date le difficoltà di realizzazione delle soluzioni precedenti, dovute soprattutto all'inaffidabilità di funzionamento dei ventilatori o del circuito dell'acqua, viene implementata una configurazione che prevede l'utilizzo di un semplice dissipatore alettato, privo di sistemi di raffreddamento attivi.

[31] https://it.rs-online.com/web/p/dissipatori/0158540/.

L'idea alla base di questo modello è quella di ridurre il più possibile il calore in ingresso al sistema assorbito dalla piastra. Nonostante sia costituita di alluminio, avente un coefficiente di assorbimento della radiazione solare relativamente basso ($\alpha_{piastra}$= 0,2), la piastra riceve comunque la maggior parte del calore in ingresso (98,4 W contro gli 8 W assorbiti dalle celle solari), a causa delle dimensioni della superficie due volte maggiore rispetto a quella occupata dalle celle.

La soluzione consiste quindi nel ricoprire la piastra con un materiale ad alta riflettanza della radiazione solare (lasciando libera ovviamente la superficie occupata dalle celle solari), dello stesso tipo di quelli utilizzati per la superficie riflettente dei concentratori solari a specchi parabolici. Il materiale scelto è il MIRO- SUN weatherproof reflective 90 della ditta Alanod[32]. Nel grafico in (fig. 4.3) viene mostrato l'andamento del coefficiente di riflessione in funzione della lunghezza d'onda e dell'angolo di incidenza.

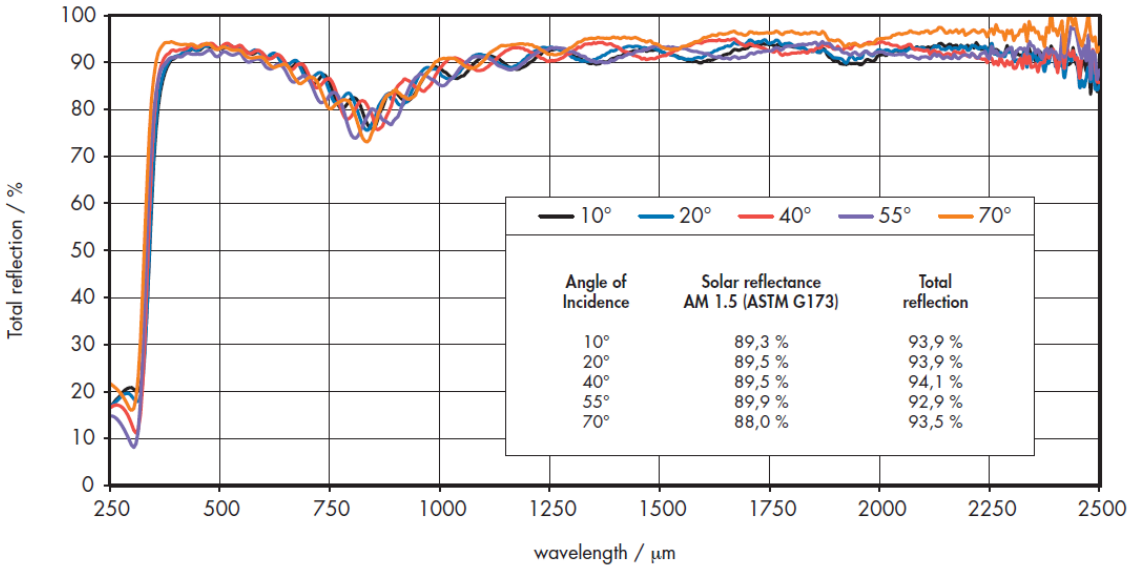


Figura 4.3 *Spettro di riflessione del materiale Miro- Sun. Figura ri-adattata dalla scheda tecnica del materiale.*

Per ottenere il valore complessivo di riflessione della radiazione solare è necessario calcolare l'integrale sulle lunghezze d'onda dei valori di riflessione moltiplicato per lo spettro di emissione della radiazione solare:

$$\alpha = \int_0^{\lambda max} I_s(\lambda)\, \alpha_s(\lambda)\, d\lambda \tag{4.11}$$

Dove $I_s(\lambda)$ e $\alpha_s(\lambda)$ sono rispettivamente la radiazione solare e il coefficiente di assorbimento del materiale in funzione della lunghezza d'onda. Il dato fornito nella scheda tecnica del prodotto indica

[32] https://www.alanod.com/en/reflection/solar-reflection/

un valore di riflessione pari a α= 90%, composto dall' 84% di riflessione speculare e dal 5- 6% di riflessione diffusa. In commercio sono presenti pellicole ancora più performanti in termini di riflessione solare, tuttavia questa soluzione è da preferirsi per l'indicazione di resistenza alle condizioni di ambiente esterno e alle alte temperature (fino ai 200 °C per 1000 h).

Il nuovo calcolo del calore in ingresso alla piastra risulta quindi:

$$Q_{in} = \Phi_s\, A_{piastra}\alpha_{piastra} + \Phi_s\, A_{celle}\alpha_{celle} = 57{,}2\ W \tag{4.12}$$

Trascurando conservativamente la dissipazione per convezione nella porzione di piastra non occupata dal dissipatore, per una corretta dispersione del calore entrante nel sistema il dissipatore da accoppiare al sistema deve avere una resistenza termica massima pari a:

$$R = \frac{Q}{\Delta T} = 0{,}7\ K/W \tag{4.13}$$

Dove ΔT è il salto di temperatura tra la piastra (70 °C) e l'ambiente (30 °C).

È stato quindi scelto il dissipatore di codice KEA 200/150 della ditta Tecnoal[33], che per le dimensioni di 200 × 150 mm indica una resistenza termica di 0,36 K/W in condizioni di convezione naturale.

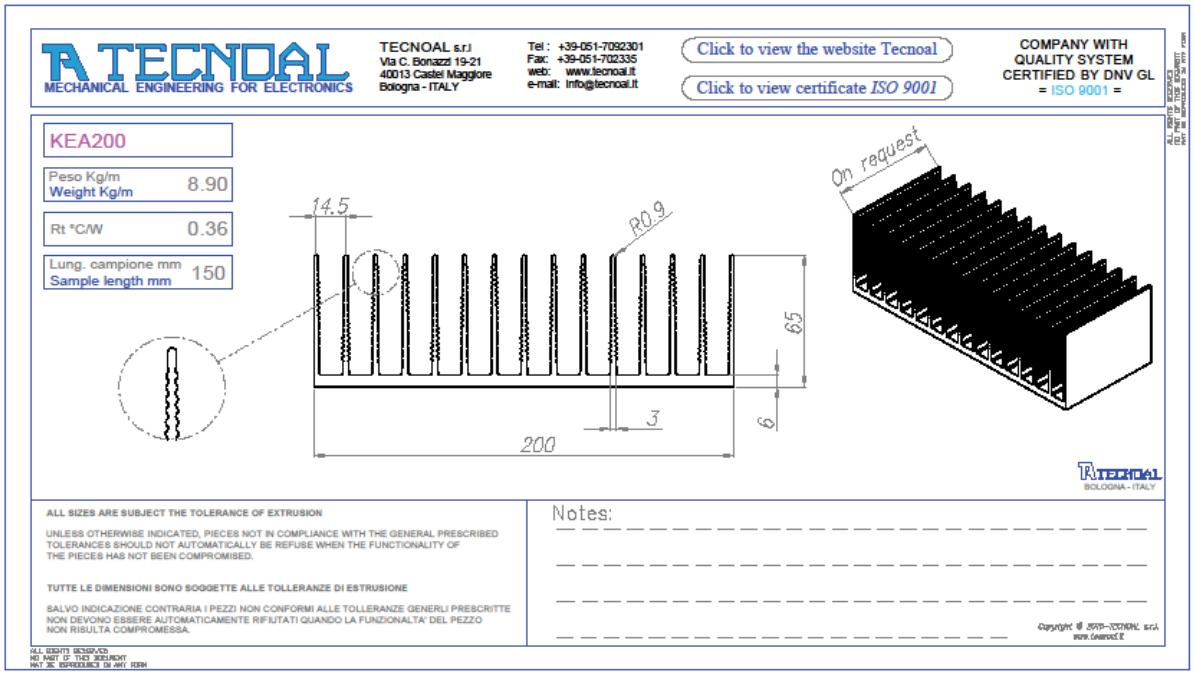


Figura 4.4 Scheda tecnica e disegno del dissipatore alettato. Figura ri-adattata dalla referenza[30].

[33] http://www.tecnoal.it/.

Di seguito viene svolta una verifica della resistenza termica del dissipatore alettato, calcolata con la formula seguente:

$$R_{diss} = \frac{1}{h\,S\,\eta} \tag{4.14}$$

Dove a sua volta S indica la superficie totale delle alette, h è il coefficiente di convezione, e η è l'efficienza dell'aletta singola:

$$\eta = \frac{\tanh(m\,b)}{m\,b} \tag{4.15}$$

Dove b è l'altezza dell'aletta e m è un coefficiente calcolato come:

$$m = \sqrt{\frac{2\,h}{\delta\,\lambda}} \tag{4.16}$$

Con δ pari allo spessore dell'aletta e λ alla conducibilità termica del materiale utilizzato (per l'alluminio λ_{al}=220 W/(m K).

Inserendo le misure fornite del dissipatore (S= 0,3m^2; b= 59mm; δ= 3mm) e un coefficiente di convezione h pari a 9,7 W/(m^2 K) si ottiene il valore di resistenza termica dichiarato dal produttore. In realtà, un coefficiente di convezione naturale pari a 9,7 W/(m^2 K) potrebbe risultare leggermente sovrastimato, come è possibile notare dalle analisi dei dati sperimentali nel capitolo 5. Tuttavia, le ipotesi conservative condotte fin ora dovrebbero compensare la minore dissipazione dovuta a questo fattore.

4.4 Modellazione dell'insieme

Con l'utilizzo del software SolidWorks, viene creata una modellazione 3D dell'insieme comprendente la piastra con le celle solari, il dissipatore alettato e la staffa per il fissaggio al braccio del concentratore. La staffa è la stessa utilizzata per il sostegno del sensore per la misura dell'irraggiamento e mostrata nel capitolo precedente.

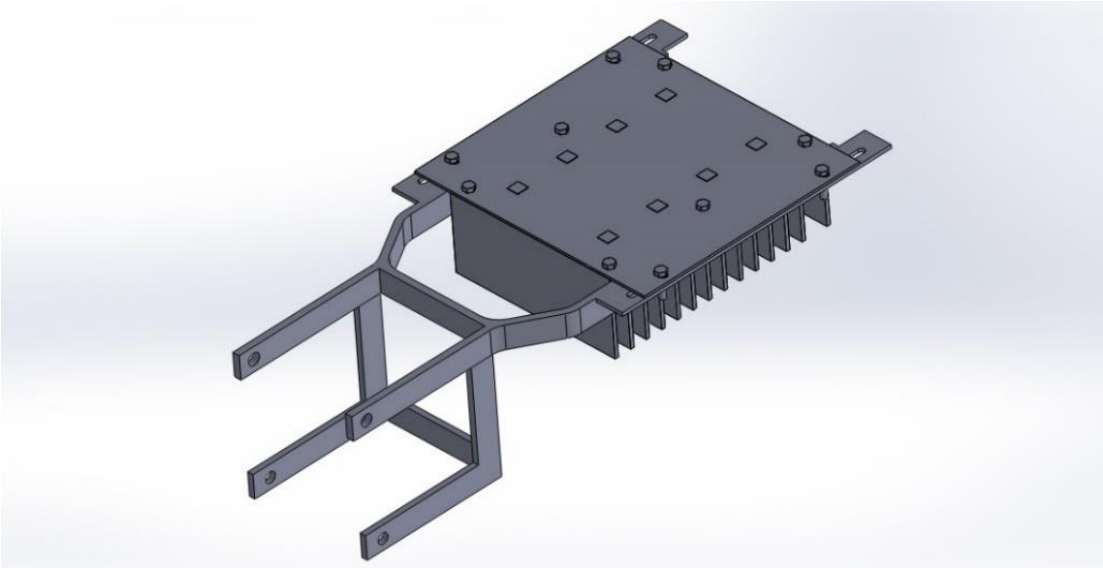


Figura 4.5 *Assemblato staffa, piastra con celle e dissipatore.*

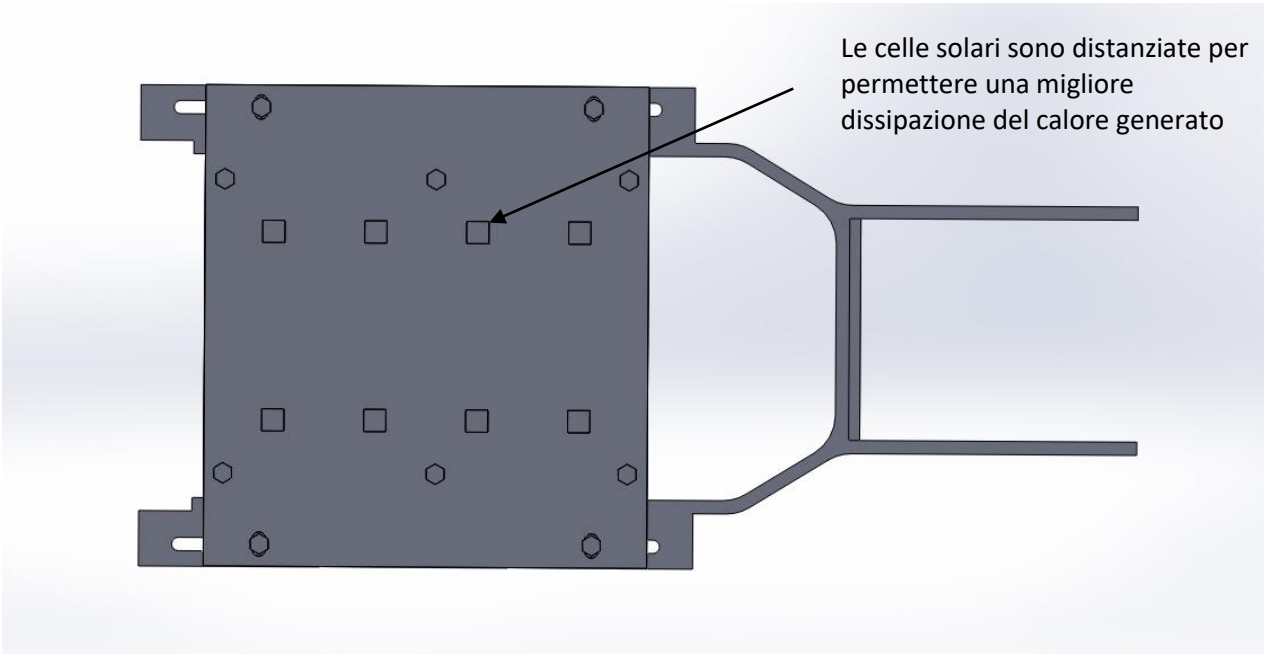


Figura 4.6 *Vista superiore dell'assieme.*

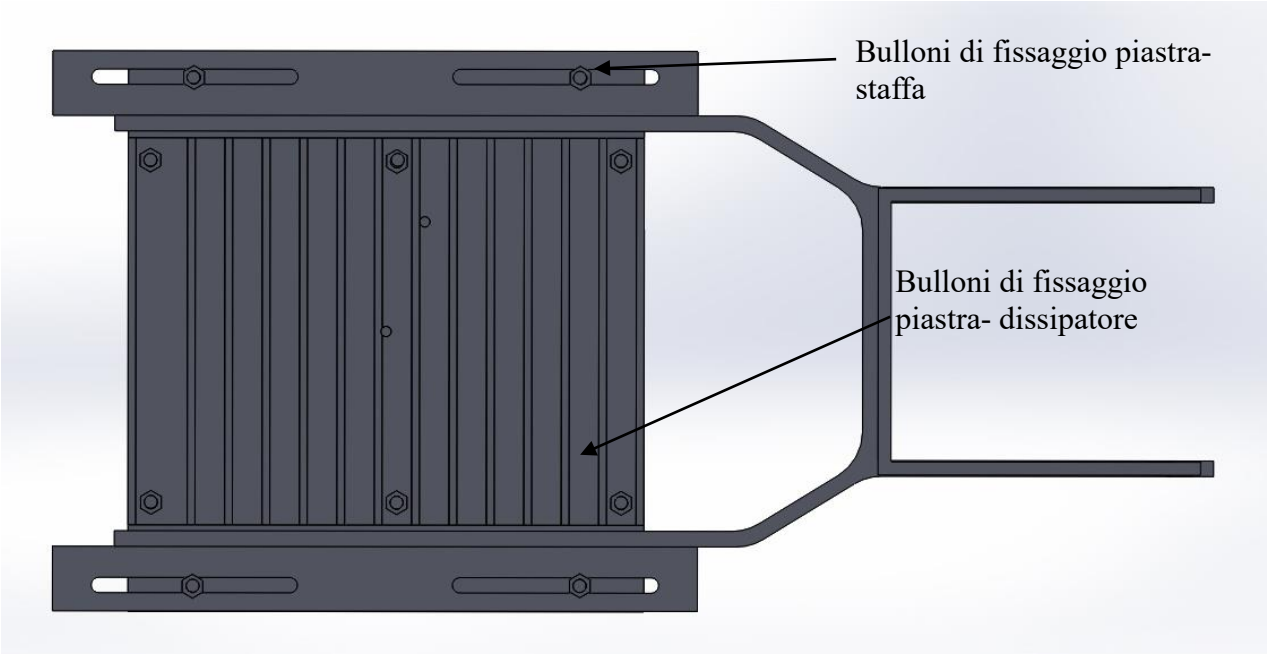


Figura 4.7 *Vista inferiore dell'assieme.*

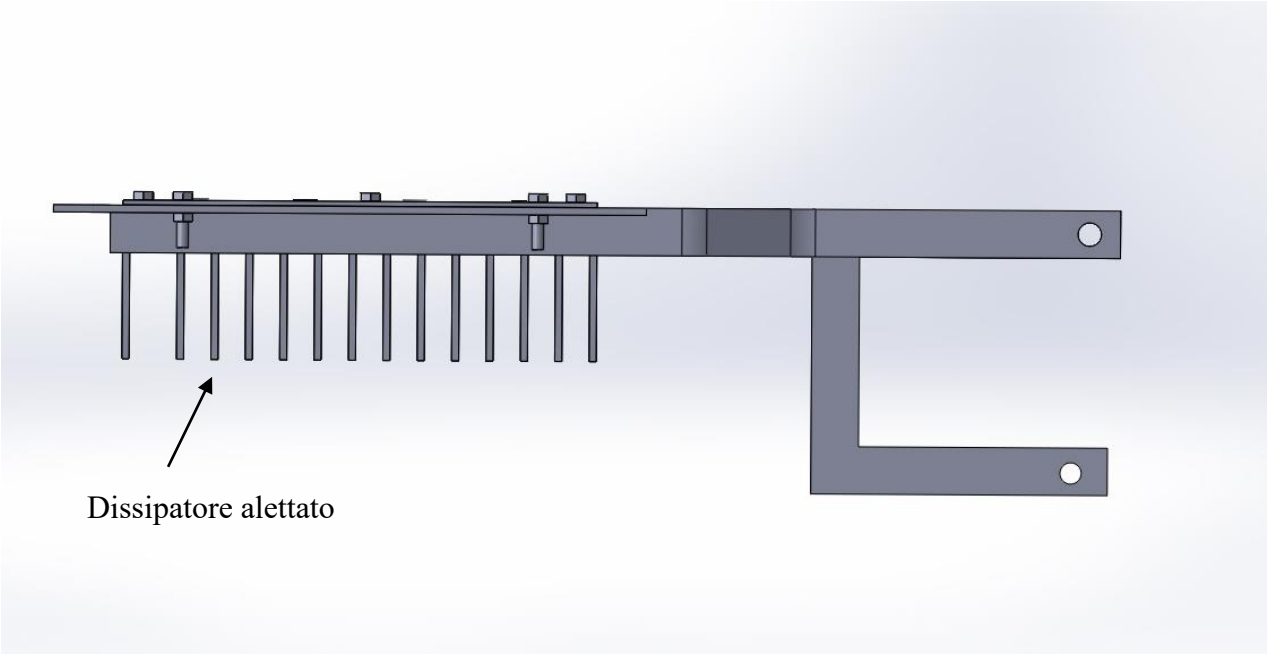


Figura 4.8 *Vista laterale dell'assieme.*

4.5 Impostazione della simulazione termica tramite Comsol

Per verificare la temperatura raggiunta dalla piastra nella configurazione con il solo dissipatore alettato, si effettua una simulazione termica tramite il software Comsol Multiphysics. La geometria è implementata soltanto per la piastra e le celle solari, mentre la presenza del dissipatore è imposta come condizione al contorno tramite la definizione del valore di resistenza termica. Si noti che il contributo della staffa per la dispersione termica viene trascurato.

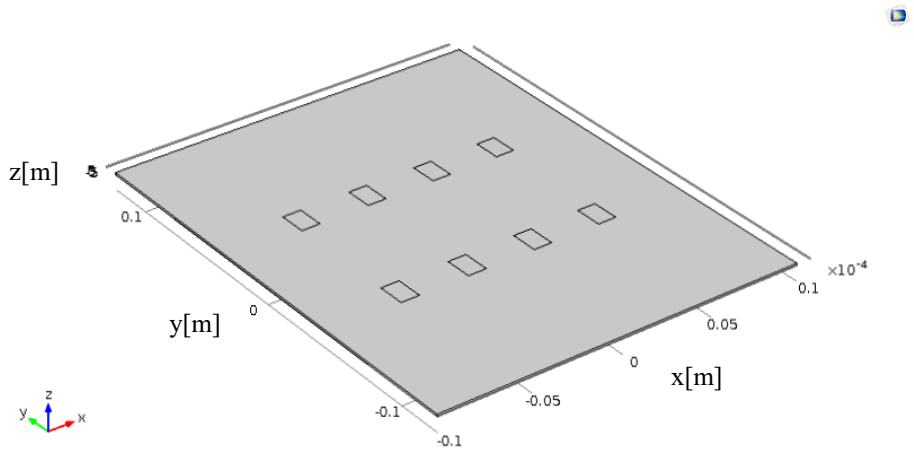


Figura 4.9 *Disegno della piastra per la simulazione termica.*

L'equazione che regola lo scambio termico nei solidi in una geometria tridimensionale utilizzata da Comsol è la seguente:

$$\rho\, cp\, \nabla T = \nabla(k\, \nabla T) + Q \tag{4.17}$$

Dove il primo termine si annulla nel caso stazionario. I parametri e le condizioni al contorno impostati sono i seguenti:

- Conducibilità dell'alluminio k= 220 W/(m^2 K).
- Calore incidente sulla superficie superiore della piastra: Q = I_s [W/m^2] × r_c × $\alpha_{piastra}$, dove I_s è il valore di irraggiamento solare diretto, a cui vengono fatti assumere diversi valori tra cui quello massimo di 1000 W/m^2, per ricavare un andamento della temperatura in funzione dell'irraggiamento, r_c è il rapporto di concentrazione pari a 10 e $\alpha_{piastra}$= 0,1.
- Calore incidente sulla superficie delle celle solari: Q = I_s [W/m^2] × r_c × α_{celle}, con α_{celle}=0,95.
- Scambio termico convettivo con coefficiente di convezione pari a 2,14 e 7,1 W/(m^2 K), rispettivamente per la superficie inferiore e superiore della piastra, esclusa la porzione di

superficie occupata dal dissipatore. Per la superficie laterale è stato impostato lo stesso coefficiente della superficie inferiore.

- Scambio termico convettivo sulla superficie occupata dal dissipatore con coefficiente di convezione pari all'inverso della resistenza moltiplicata per l'area di base del dissipatore A_{diss} ($h = 1/(R_{diss} \times A_{diss}) = 92{,}5$ W/(m^2 K)).
- Temperatura dell'ambiente esterno pari a 30 °C.
- Scambio termico per radiazione per entrambe le superfici della piastra, con emissività dell'alluminio ipotizzata pari a 0,1. Per entrambe le superficie della piastra viene ipotizzato un fattore di vista unitario verso il cielo. Infatti, la superficie superiore è orientata verso l'alto, mentre quella inferiore verso la superficie della parabola, che è da considerarsi riflettente nel campo dell'infrarosso e quindi riflette la radiazione termica verso il cielo.
- Temperatura del cielo pari a -10 °C.

4.6 Risultati dell'analisi termica

L'obiettivo della simulazione termica è quello di assicurare che la temperatura delle celle solari stia sempre al di sotto del valore di soglia di 70 °C, anche per le condizioni ambientali più severe (ovvero in assenza di vento e con irraggiamento solare incidente e diretto pari a $I_s = 1000$ W/m^2).

La distribuzione di temperatura ottenuta con i parametri indicati è quella mostrata in figura 4.10.

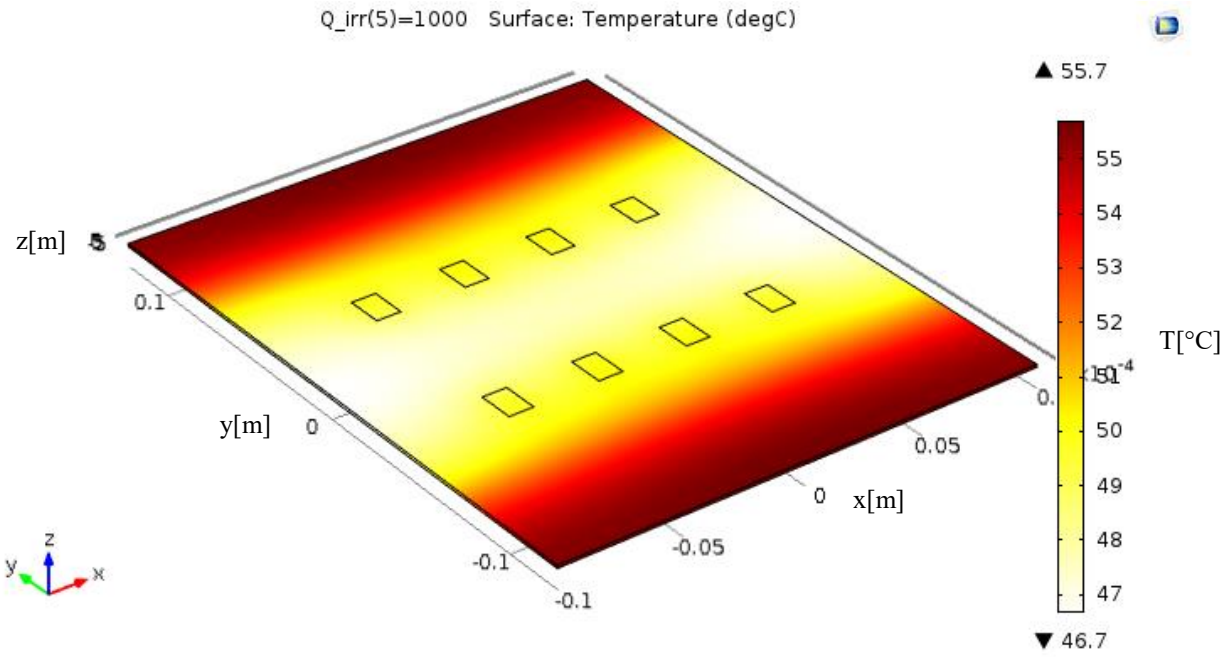


Figura 4.10 Distribuzione della temperatura sulla piastra per un valore di irraggiamento pari a 1000 W/m^2.

La temperatura media della piastra è di 51 °C, mentre la temperatura massima raggiunta è pari a 55,7 °C. Tuttavia, a causa della presenza del dissipatore nella parte della piastra sottostante alle celle, si può notare che la parte centrale della piastra occupata dalle celle solari risulta anche la più fredda. Le celle solari pertanto raggiungono una temperatura massima di 52,3 °C.

I grafici seguenti (fig. 4.11, 4.12) mostrano l'andamento della temperatura media e massima della piastra e delle celle al variare dell'irraggiamento solare incidente, da un valore nullo fino a quello massimo pari a 1000 W/m^2.

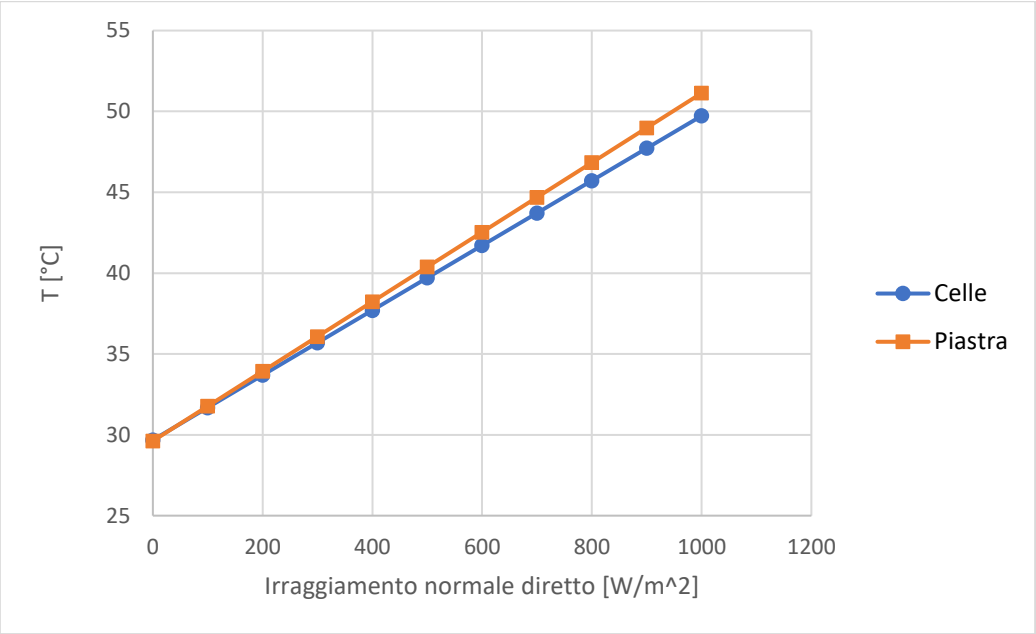


Figura 4.11 *Andamento della temperatura media del sistema al variare dell'irraggiamento.*

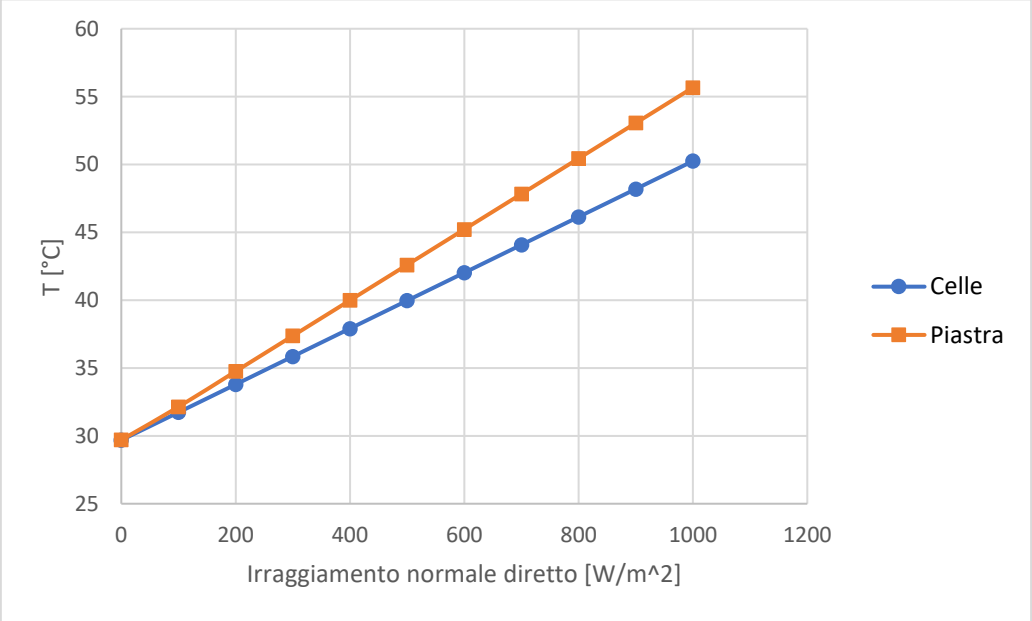


Figura 4.12 *Andamento della temperatura massima del sistema al variare dell'irraggiamento.*

Per un irraggiamento solare nullo, la temperatura della piastra è pari a quella dell'ambiente esterno.

Come si può notare dall'andamento lineare, l'emissione di calore per irraggiamento è poco incidente sullo scambio termico totale. Ciò è dovuto alle temperature moderate raggiunte dal sistema e alla bassa emissività dell'alluminio nel campo dell'infrarosso.

5. Prove sperimentali

5.1 Verifica della radiazione totale assorbita dalle celle

Per una corretta analisi dei risultati delle prove di invecchiamento sulle celle solari, è necessario conoscere la quantità totale di energia assorbita durante il tempo della prova. Questo valore può essere ricavato dall'integrale dell'irraggiamento incidente sulla cella nel tempo.

L'irraggiamento incidente potrebbe essere misurato a sua volta dal sensore per la misura dell'irraggiamento, che tuttavia non può essere installato sul concentratore solare per tutta la durata del test, a causa della fragilità del sensore che potrebbe venire danneggiato se esposto alle condizioni di ambiente esterno per un lungo periodo. Pertanto, è necessario ricavarlo indirettamente conoscendo il valore dell'irraggiamento solare diretto (privo del componente diffuso) e normale alla direzione dei raggi del sole, e il rapporto di concentrazione, stimato grazie al sensore come mostrato nel capitolo 3.

Tuttavia, anche un sistema di misura dell'irraggiamento solare diretto e normale non è di facile implementazione, infatti l'utilizzo di un comune piranometro fornirebbe soltanto il valore di irraggiamento solare globale e incidente su un piano fisso lungo l'arco della giornata.

Di seguito sono proposte due soluzioni per la stima di tale valore.

Utilizzo dei dati forniti da PVGIS

Il software PGVIS[34] fornisce, per una località predefinita, il profilo orario mensile dei valori di irraggiamento medio globale e diffuso su un piano normale alla direzione dei raggi del sole. Sottraendo questi due valori si può ricavare il valore di irraggiamento normale e diretto. Con un semplice integrale è quindi possibile stimare la quantità di irraggiamento specifica [MJ/m^2] per qualsiasi periodo annuale desiderato. Di seguito è rappresentato l'andamento di questo valore per i mesi dell'anno (fig. 5.1) a Torino.

[34] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php

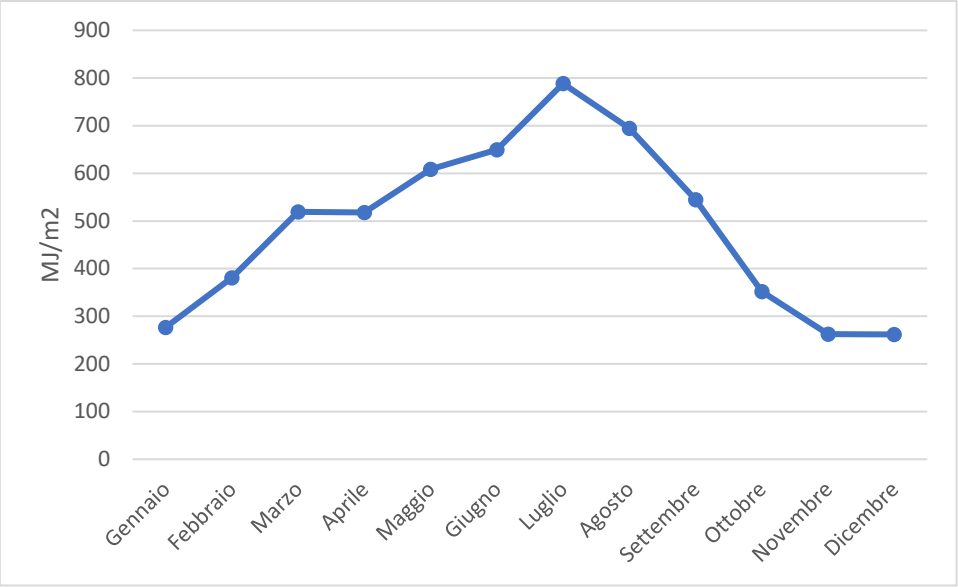


Figura 5.1 *Energia mensile incidente su un piano normale alla radiazione solare.*

Moltiplicando questi valori per il rapporto di concentrazione e per l'area delle celle, si può ottenere la quantità di energia totale incidente per ogni mese considerato.

Tuttavia, questo metodo risulta impreciso, in quanto non tiene conto della variabilità meteorologica, che potrebbe alterare significativamente il valore reale.

Utilizzo dei dati forniti da una centralina meteo

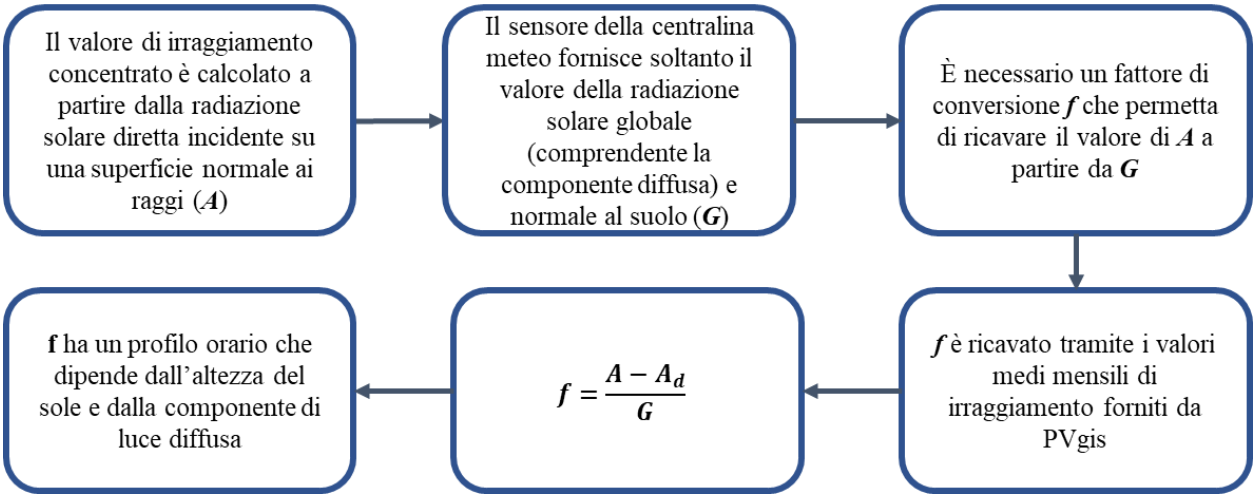


Figura 5.2 *Diagramma dei passaggi per determinare il fattore f*

Nonostante il sensore di una centralina meteo -analogamente ad un piranometro- fornisca soltanto il valore di irraggiamento solare globale e incidente su un piano parallelo al suolo, il valore di irraggiamento solare diretto e normale può essere ricavato con l'introduzione di un fattore calcolato in modo da mettere in relazione le due misure (fig. 5.2). Nuovamente, grazie a PVGIS, viene ricavato il profilo medio giornaliero della radiazione globale incidente su un piano parallelo al suolo

(G), quello della radiazione globale normale ai raggi solari (A) ed infine quello della radiazione diffusa e normale ai raggi (A_d). Il fattore è calcolato quindi come:

$$f = \frac{A - A_d}{G} \tag{5.1}$$

Questo valore ha un andamento variabile nel corso nella giornata, come è possibile notare dal grafico seguente ricavato con i valori per il mese di maggio a Torino (fig. 5.3).

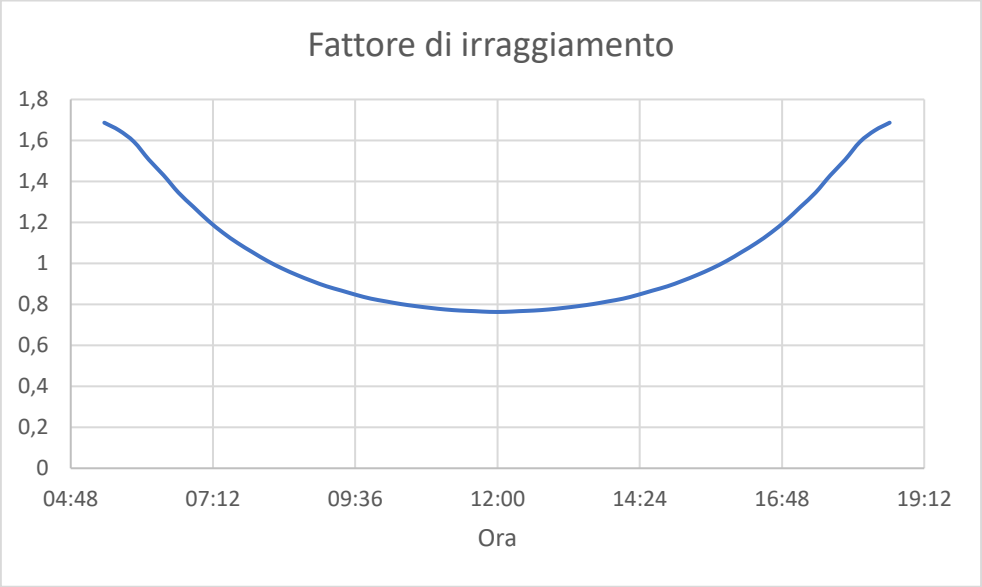


Figura 5.3 *Andamento del fattore di irraggiamento nel corso della giornata.*

Moltiplicando quindi il fattore per il valore di irraggiamento globale e normale al suolo, fornito da un sensore di irraggiamento, si ottiene quindi il valore di irraggiamento diretto e normale. L'inconveniente di questo metodo si può riscontrare nelle giornate nuvolose, quando l'assenza di sole causa un annullamento totale dell'irraggiamento diretto, al contrario della componente diffusa che continua ad essere presente. Una soluzione a questo problema potrebbe essere quella di analizzare i dati forniti dal sensore tramite un programma, che renda nulli tutti quei valori al di sotto di una certa percentuale (es. 30%) dell'irraggiamento a cielo sereno previsto per quelle ore della giornata.

La centralina meteo da utilizzare per determinare i valori di irraggiamento potrebbe essere quella già installata nelle vicinanze del concentratore solare, i cui dati sono forniti sul sito del LivingLAB.[35]

Questo metodo di monitoraggio della radiazione solare risulta abbastanza impreciso, in quanto il rapporto tra la componente diretta e diffusa della radiazione solare varia in base a molti fattori,

[35] http://smartgreenbuilding.polito.it/monitoraggio/esterno.asp

come la nuvolosità, l'umidità e la temperatura dell'aria. Tuttavia, con gli accorgimenti descritti, i risultati dovrebbero essere più affidabili di un semplice calcolo della radiazione media incidente su un determinato periodo.

Utilizzo di un piranometro installato sul concentratore

Una misura diretta dei valori di irraggiamento diretto e normale, potrebbe essere effettuata sfruttando il sistema di inseguimento solare del concentratore stesso. Infatti, installando un piranometro direttamente su un componente mobile del concentratore, si potrebbe fare sì che in ogni istante il piano di lettura del sensore sia normale alla radiazione solare. La componente di irraggiamento diffusa, inoltre, potrebbe essere eliminata inserendo il piranometro all'interno di un tubo avente le estremità libere, per fare in modo che la radiazione giungente sul sensore sia soltanto quella del sole e non del cielo circostante. Anche questo sistema, tuttavia, sarebbe di difficile implementazione, in quanto il piranometro, dispositivo molto delicato, sarebbe sottoposto per un tempo prolungato alle condizioni di ambiente esterno, rischiando malfunzionamenti o rotture.

5.2 Monitoraggio delle temperature

La simulazione termica indica che la temperatura delle celle solari per tutta la durata del test dovrebbe rimanere al di sotto del valore limite (70 °C) anche per le condizioni ambientali più critiche. Tuttavia, per una maggiore sicurezza, e per le necessità di valutazione delle condizioni in cui avviene il test, si è deciso di implementare un sistema di acquisizione delle temperature. Per questa applicazione è sufficiente il salvataggio delle temperature rilevate su un dispositivo locale. Data la necessità di ingombri ridotti del sistema e per poterlo facilmente isolare dalle intemperie, si è scelto di utilizzare una scheda Arduino per l'acquisizione e il salvataggio dei dati.

Per il sensore di temperatura si è optato per due termocoppie di tipo K ad isolamento minerale in acciaio inossidabile, da inserire in due punti distinti della piastra. Il cavo di trasmissione del segnale deve avere una lunghezza adeguata (circa 5 m) tale da permettere una connessione al sistema di acquisizione posto alla base del concentratore solare, ed è rivestito da una guaina isolante in PFA per proteggerlo dall'umidità e dalle alte temperature (fino ai 250 °C).

L'insieme per l'acquisizione delle temperature è composto da una scheda Arduino Uno, due Moduli Max6675 per l'amplificazione del segnale della termocoppia, un modulo RTC (Real Time Clock) per associare ai dati l'istante di tempo in cui viene fatta la misura e un modulo per schede SD.

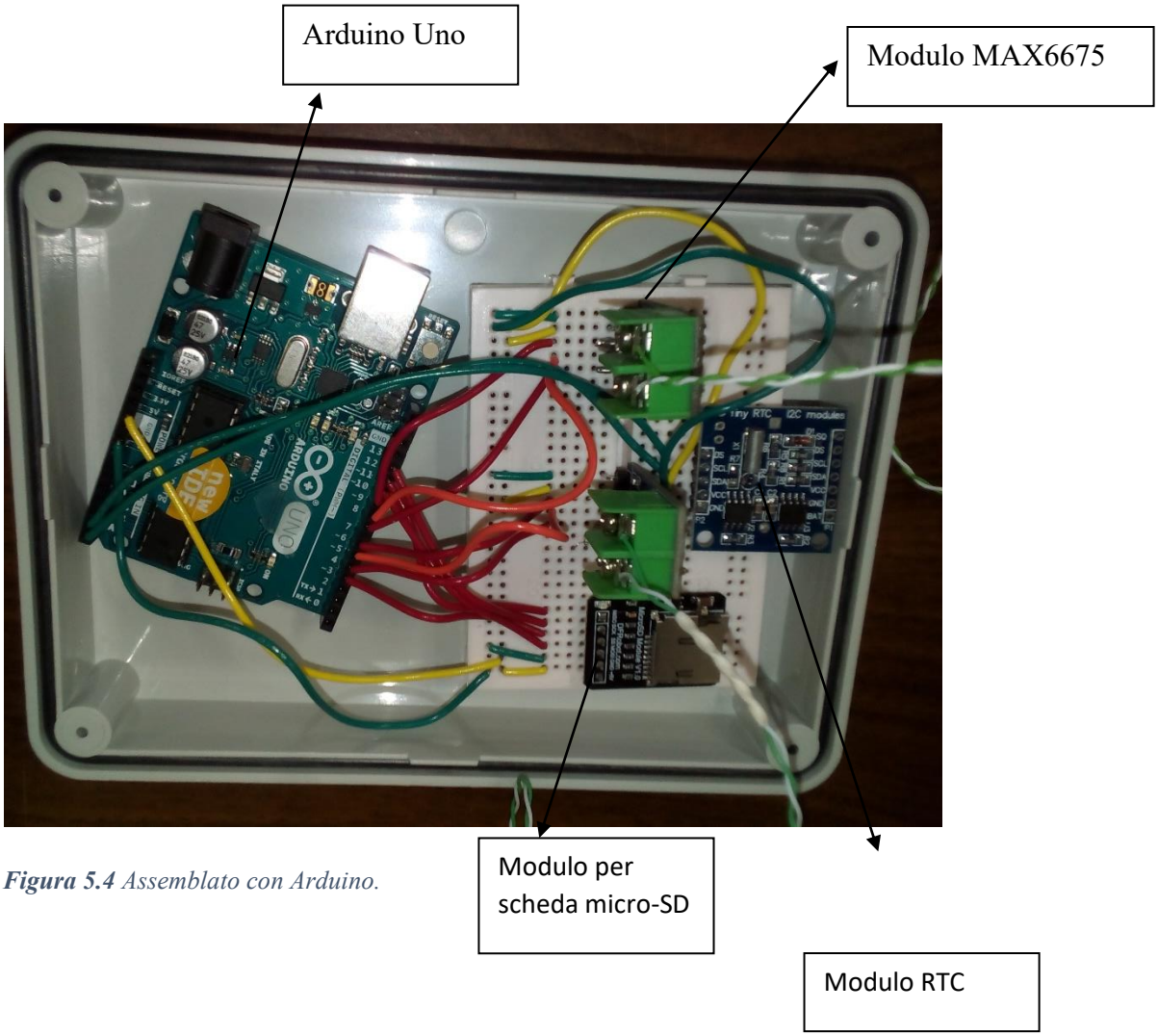


Figura 5.4 *Assemblato con Arduino.*

Il sistema è racchiuso in una scatola impermeabile pensata per componenti elettrici, con grado di protezione dichiarato IP56. Programmando opportunamente la scheda Arduino, è possibile acquisire le temperature con una frequenza di campionamento di circa un minuto e salvarle sulla scheda micro-SD, che può essere rimossa per l'acquisizione dei dati.

5.3 Verifica sperimentale della temperatura

Prima della conduzione del test con le celle solari, si è ritenuto opportuno effettuare una verifica sperimentale delle temperature raggiunte da un sistema posto sul concentratore solare Innova. I risultati sperimentali verranno quindi confrontati con la temperatura stimata tramite un modello matematico unidimensionale. Il valore del rapporto di concentrazione considerato si basa sui risultati raggiunti tramite la simulazione ottica, in attesa di ricevere e testare il sensore per la misura dell'irraggiamento concentrato.

Costruzione della staffa

La staffa modellata tramite SolidWorks, come mostrato nel capitolo 4, è costruita a partire da alcune sbarre di ferro con spessore 6 mm e altezza 20 mm, opportunamente tagliate, saldate e forate. Il pezzo finale è poi trattato con una vernice zincante a freddo, per proteggerlo dall'ossidazione, e dotato di due bulloni di diametro 8 mm per il serraggio sul braccio del concentratore.

Figura 5.5 *Foto della staffa.*

Costruzione della piastra e assemblaggio

Per la costruzione della piastra da connettere alla staffa, sono utilizzate le lastre in alluminio lucidato, aventi dimensioni 200 × 300 × 1,2 mm, tagliate e forate secondo le misure previste. La piastra è quindi accoppiata al dissipatore tramite otto bulloni, con un sottile strato di pasta termica (del tipo Composto per Dissipatore RS Pro, k= 0,65 W/(m^2 K)) intermedio per mitigare l'effetto negativo dovuto alla resistenza termica di contatto. Nella parte superiore sono posizionate otto piastrine di 1,5 cm^2 l'una in Tinox, il cui alto assorbimento della radiazione solare (95%) permette di simulare la presenza delle celle solari. Le celle sono fissate alla piastra utilizzando un sottile strato di resina termica bicomponente, che funge sia da connessione termica che da adesivo. Infine, nella parte inferiore della piastra è accoppiato il dissipatore.

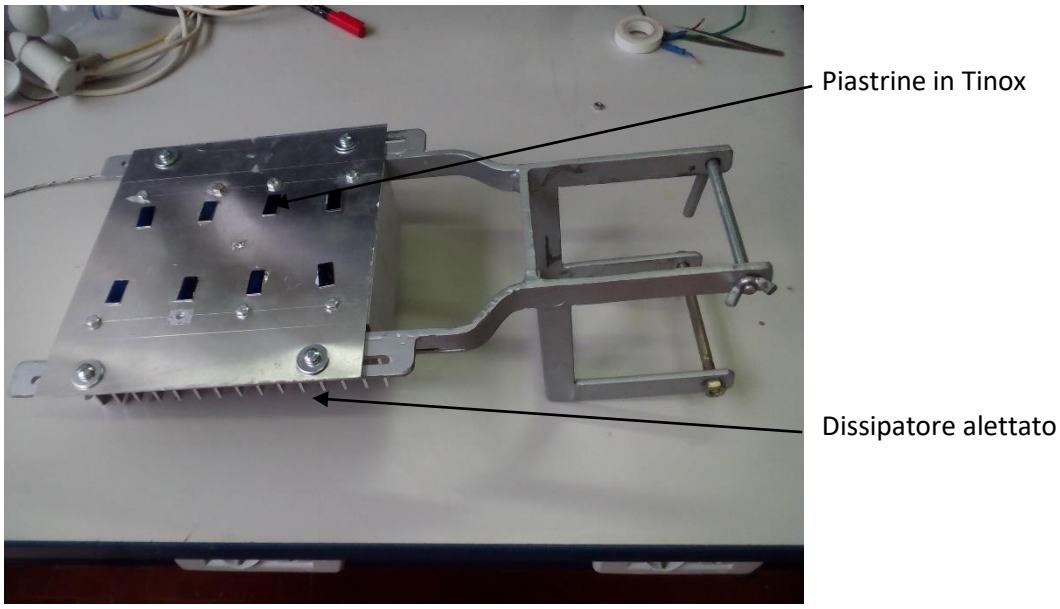


Figura 5.6 *Foto dell'assemblato piastra, dissipatore e staffa.*

Per le prove sperimentali si è utilizzata una termocoppia di tipo J in acciaio inossidabile, con l'estremità della sonda saldata ad una piccola piastrina inserita tra la piastra e il dissipatore, come visibile in figura 5.7.

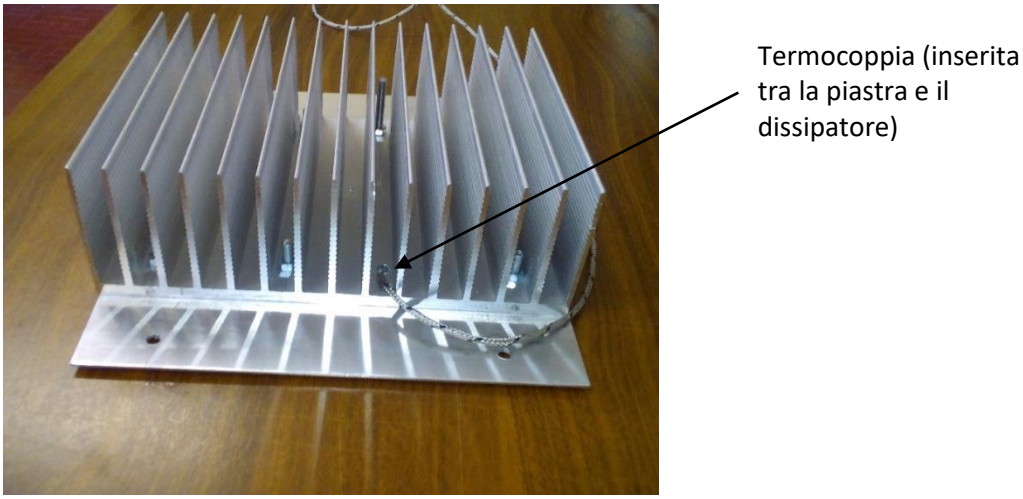


Figura 5.7 *Vista inferiore del sistema di piastra e dissipatore. È visibile il foro utilizzato per l'inserimento della termocoppia.*

Le misurazioni sono condotte per quattro configurazioni della piastra differenti:

- Una piastra semplice, senza dissipatore e senza celle in Tinox;
- Una piastra dotata di dissipatore senza celle;
- Una piastra dotata di celle senza dissipatore;
- Una piastra dotata di celle e dissipatore.

Acquisizione delle temperature

Progettata per la lettura delle termocoppie di tipo K, il sistema di acquisizione delle temperature con la scheda Arduino non è adatto alla configurazione descritta; pertanto viene utilizzato il modulo di acquisizione per termocoppie della National Instruments di codice NI 9212, accoppiato al modulo DAQ (Data Acquisition) di codice NI 9174.

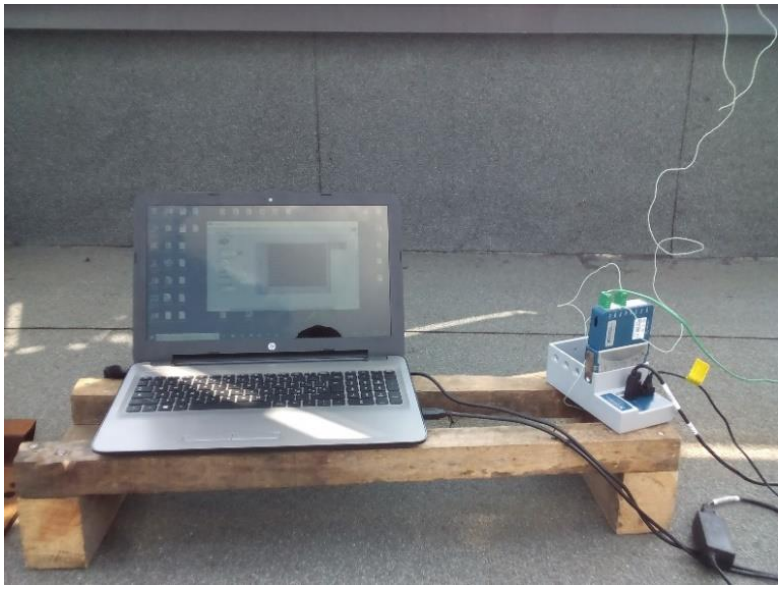


Figura 5.8 *Foto che mostra l'acquisizione dei dati durante le prove in campo.*

5.4 Bilancio termico per il calcolo della temperatura di modello

Per la validazione del modello teorico su cui si basa la simulazione termica, è utile confrontare le temperature acquisite durante la prova sperimentale con quella teorica ricavata da un modello monodimensionale di dissipazione del calore. Questo modello varia a seconda della configurazione in analisi, ovvero in base alla presenza o meno del dissipatore, che aggiunge una resistenza termica al sistema. L'eventuale presenza delle piastrine in Tinox simulanti le celle solari, induce una variazione del coefficiente di assorbimento della radiazione solare, ma resta invariata l'equazione utilizzata. Il modello utilizzato è valido per il caso stazionario, approssimazione necessaria dovuta alla bassa frequenza di campionamento di quindici minuti con cui sono forniti i parametri necessari al modello (es. velocità del vento e irraggiamento solare). Questa assunzione è una buona approssimazione nella configurazione con la presenza della sola piastra, a causa della bassa inerzia termica del sistema. Questa ipotesi potrebbe condurre ad imprecisioni nel caso della configurazione con la presenza del dissipatore, a causa della maggiore inerzia termica dovuta alla massa non trascurabile del dissipatore.

Bilancio termico della piastra senza dissipatore

L'equazione di bilancio termico è la seguente:

$$Q = 2\,A\,\left(h\,(T - T_{amb}) + \,\sigma\,\varepsilon\,(T^4 - T_{cielo}^4)\right) \tag{5.2}$$

Dove i termini dell'equazione rappresentano:

- Q è il calore entrante per irraggiamento solare concentrato;
- A è pari alla superficie superiore (o inferiore) della piastra;
- h *è* il coefficiente di convezione naturale;
- T_{amb} è la temperatura ambiente rilevata dalla centralina meteo;
- σ e ε son rispettivamente la costante di Boltzmann e l'emissività della superficie della piastra, quest'ultima pari a 0,1. Il fattore di vista è considerato unitario verso il cielo.
- T_{cielo} la temperatura apparente del cielo, assunta pari a -10 °C.

Per la soluzione dell'equazione è innanzitutto necessaria una stima del calore Q, calcolato come:

$$Q = G_s\,f\,r_c\,\alpha\,A \tag{5.3}$$

Dove:

- G_s è la radiazione solare globale normale al terreno misurata dal piranometro;
- f *è* il fattore di conversione della radiazione solare globale/ radiazione solare diretta e normale ai raggi del sole, e varia in base all'ora e il mese in cui viene effettuata la misura;
- r_c misura il rapporto di concentrazione in base alla distanza dal fuoco del paraboloide, stimato grazie alla simulazione ottica;
- α è il coefficiente di assorbimento della radiazione solare del sistema, ed è posto pari a 0,15 per la piastra in alluminio semplice, mentre per la piastra con gli elementi in Tinox viene calcolata tramite una media pesata ($\alpha_{Tinox} = 0{,}95$):

$$\alpha_{globale} = \frac{\alpha_{al}\left(A_{piastra} - A_{celle}\right) + \,\alpha_{Tinox}\,A_{celle}}{A_{piastra}} = 0{,}171 \tag{5.4}$$

Per quanto riguarda il calcolo del coefficiente di convezione naturale, viene utilizzata una correlazione empirica per direzione del vento parallela al piano della piastra:

$$Nu = 0{,}680\,Re^{\frac{1}{2}}\,Pr^{\frac{1}{3}} \tag{5.5}$$

Dove il numero di Reynolds è vale:

$$Re = \frac{\rho\, v\, D_{eq}}{\mu} \tag{5.6}$$

v è la velocità del vento fornita dalla Stazione Meteorologica e il Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino[36]. Dal numero di Nusselt è possibile ricavare direttamente il coefficiente di convezione h:

$$h = \frac{Nu\, \lambda}{D} \tag{5.7}$$

L'unico termine incognito dell'equazione di bilancio termico iniziale è la temperatura della piastra T. A causa della presenza dello scambio termico per irraggiamento verso il cielo, è presente un termine della temperatura elevato alla quarta potenza.

$$(\sigma\, \varepsilon)\, T^4 + h\, T - \left(T_{Amb}\, h - T_{amb}^4\, \sigma\, \varepsilon - \frac{Q}{2\, A}\right) = 0 \tag{5.8}$$

La soluzione dell'equazione di quarto grado è affidata a Matlab, tramite l'utilizzo della funzione *fzero*.

Bilancio termico della piastra con il dissipatore

La presenza del dissipatore alettato rende più difficoltosa la valutazione dello scambio termico. Infatti, la resistenza termica del dissipatore può variare di molto in base all'angolo di incidenza del vento sul sistema, favorevole alla dissipazione del calore se la direzione è parallela al piano delle alette, difficilmente valutabile nel caso in cui la direzione sia perpendicolare, a causa della formazione di sacche d'aria e ricircoli. Pertanto, per il dissipatore si è considerata una resistenza termica fissa, leggermente superiore a quella dichiarata dal produttore e pari a 0,4 [K m^2/W].

L'equazione di bilancio termico è la seguente:

$$Q = \frac{1}{R_{tot}}\, (T\, - T_{amb}) + 2\, \sigma\, \varepsilon\, A\, (T^4 - T_{amb}^4) \tag{5.9}$$

Con R_{tot} pari alla resistenza termica totale del sistema, rappresentata dallo schema seguente (fig. 5.9).

[36] http://www.meteo.dfg.unito.it/.

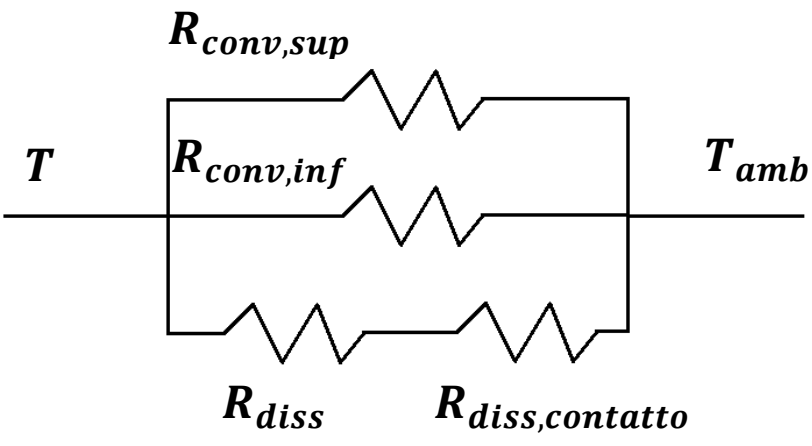


Figura 5.9 Schema delle resistenze termiche del sistema.

Il valore della resistenza termica totale vale quindi:

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{diss} + R_{cont} + \frac{s_{diss}}{\lambda_{al}\, A_{diss}}} + (A - A_{diss})\, h + A\, h} \tag{5.10}$$

Dove

- R_{diss} è la resistenza del dissipatore alettato;
- R_{cont} è la resistenza termica di contatto calcolata ipotizzando uno spessore dello strato di contatto pari a 0,5 mm e un valore di conducibilità termica pari a quello della pasta termica utilizzata (0,65 [W/m^2 K]);
- $\frac{s_{diss}}{\lambda_{al}\, A_{diss}}$ è la resistenza termica per conduzione nel primo tratto del dissipatore;
- Il secondo termine a denominatore rappresenta lo scambio termico per convezione nella parte inferiore della piastra non coperta dal dissipatore;
- L'ultimo temine rappresenta la convezione per la parte superiore della piastra.

Gli altri termini dell'equazione sono calcolati in modo analogo a quanto già indicato per la configurazione precedente. Anche in questo caso ne risulta un'equazione di quarto grado, risolta tramite Matlab:

$$Q = \frac{1}{R_{tot}}\,(T - T_{amb}) + 2\,\sigma\,\varepsilon\,A\,(T^4 - T_{amb}^4) \tag{5.11}$$

5.5 Risultati delle prove sperimentali

Assemblata la piastra e inserita sulla staffa, viene montata sul concentratore solare Innova per la verifica sperimentale delle temperature raggiunte in condizioni di irraggiamento solare e vento variabile.

Le prove sono condotte per le quattro configurazioni del sistema descritte.

Le temperature vengono quindi confrontate con quella teoriche stimate dal modello impostato in precedenza, ricavate grazie ai valori di irraggiamento e della velocità del vento forniti dal piranometro e dalla centralina meteo del Politecnico di Torino, integrati e confrontati con i dati forniti dalla Stazione Metereologica del dipartimento di Fisica dell'Università di Torino.

Per ognuna delle quattro configurazioni in esame è inoltre implementata tramite il software Comsol Multiphysics una simulazione tridimensionale della distribuzione di temperatura sulla piastra, per un singolo punto di misura.

Figura 5.10 *Montaggio del sistema sul gambo del concentratore solare.*

Figura 5.11 *Piastra esposta all'irraggiamento concentrato.*

Configurazione "solo piastra"

Questa configurazione prevede l'acquisizione della temperatura raggiunta dalla piastra senza celle in Tinox e senza dissipatore. Le misure sono condotte nella giornata del 24/05/2018, per quattro posizioni lungo il braccio del ricevitore diverse: 100, 65, 50 e 40 cm di distanza dal fuoco, che coincidono ad un rapporto di concentrazione rispettivamente pari a 3,82, 8,64, 13,78 e 20,68. Escludendo il transitorio di temperatura inziale per il riscaldamento della piastra (di circa dieci minuti), la temperatura è campionata con una frequenza di un secondo. In seguito, viene calcolata la media ogni 15 minuti per poter confrontare i dati acquisiti con quelli rilevati dalla stazione meteo e forniti con un'analoga frequenza di campionamento.

Le temperature rilevate e quelle calcolate tramite il modello sono mostrate per il primo grafico (fig. 5.12) in associazione al calore assorbito dalla piastra, per il secondo grafico al rapporto di concentrazione relativo alla distanza dal fuoco (fig. 5.13).

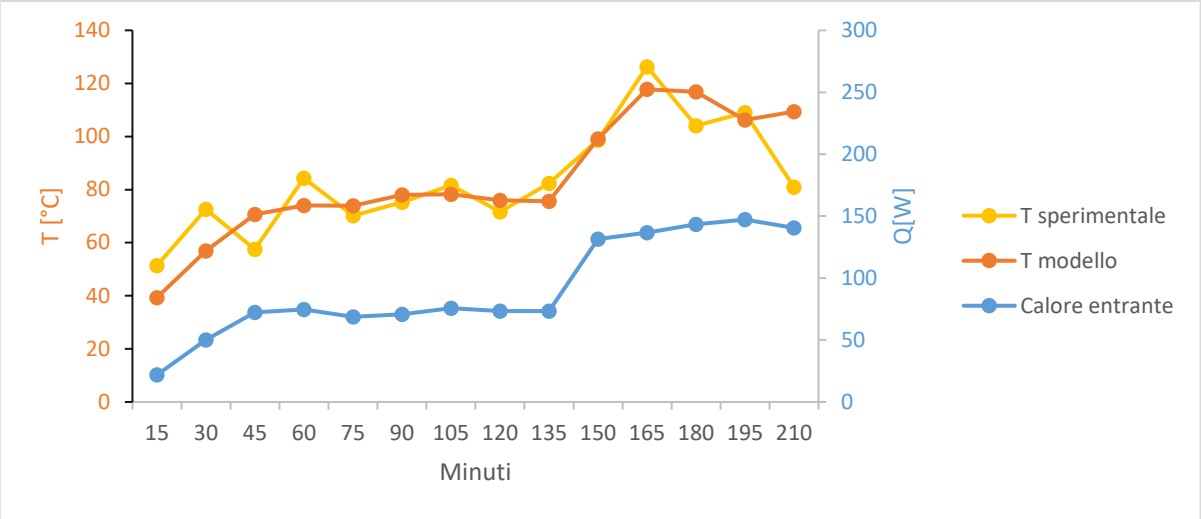


Figura 5.12 *Andamento della temperatura e del calore entrante nel sistema per la configurazione "Solo piastra".*

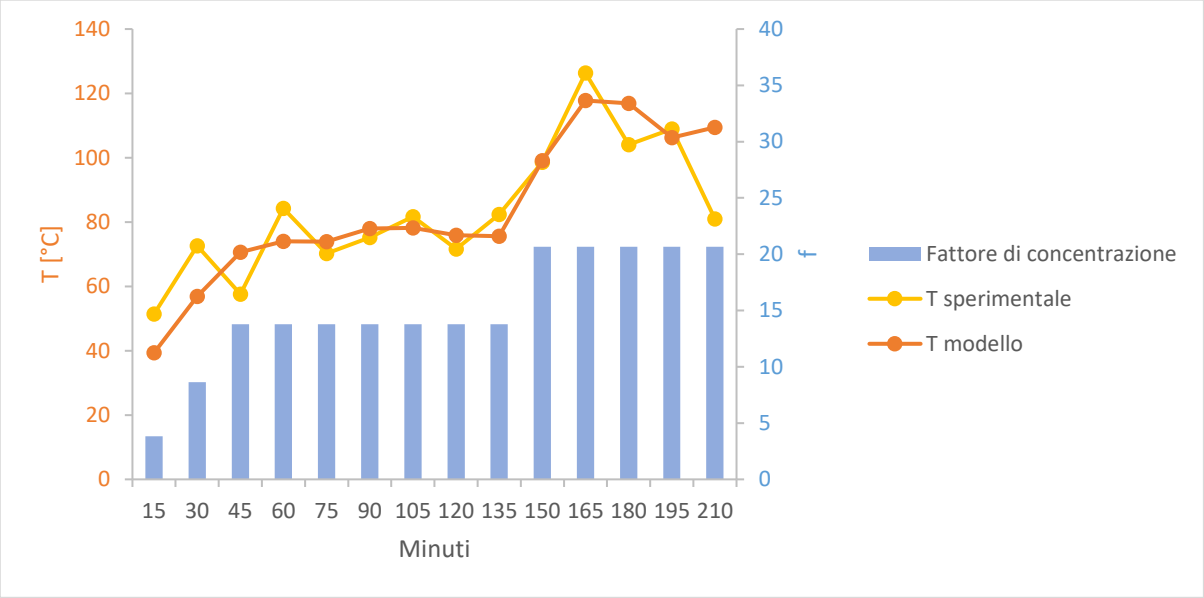


Figura 5.13 *Andamento della temperatura e del fattore di concentrazione per la configurazione "Solo piastra".*

È possibile notare che il trend della temperatura ricavata tramite il modello sperimentale è simile a quello della temperatura misurata. Le discrepanze presenti sono da attribuire alla difficoltà di valutazione dei parametri, tra i quali il coefficiente di scambio termico convettivo e il coefficiente di assorbimento della radiazione. Risulta un errore medio tra le due misure pari a 8,9 °C.

La simulazione termica tridimensionale con Comsol è effettuata per un singolo punto di misura, assumendo come condizioni al contorno quelle rilevate dai sensori. Ci si aspetta che la temperatura media risulti simile a quella del modello unidimensionale, pari a 56,9 °C nel punto di misura in analisi (fig. 5.14).

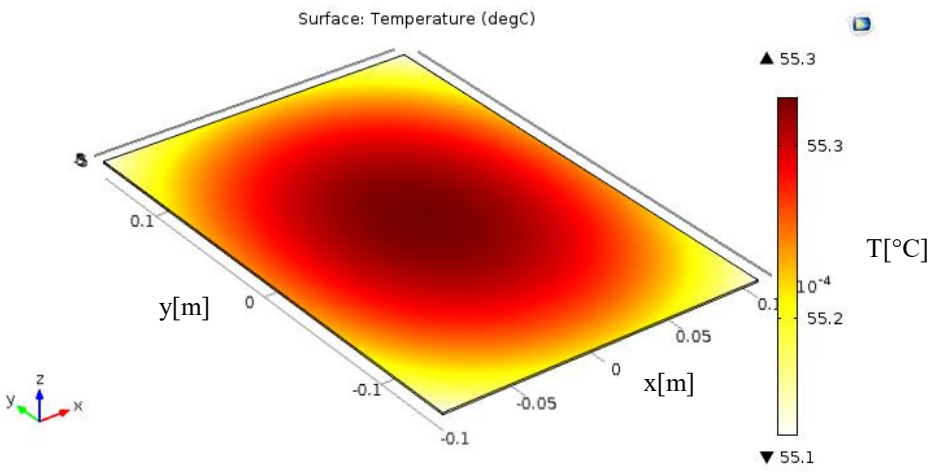


Figura 5.14 Distribuzione della temperatura sulla piastra ottenuta tramite la simulazione termica.

Le temperature maggiori sono raggiunte al centro della piastra, con una distribuzione abbastanza omogenea grazie all'alta conducibilità termica dell'alluminio. La temperatura media sulla superficie superiore fornita da Comsol (55,27 °C) è simile a quella calcolata tramite il modello monodimensionale. Ciò indica che il modello monodimensionale utilizzato è una buona approssimazione del caso reale.

Configurazione "piastra con dissipatore"

Per questa configurazione viene aggiunto al sistema il dissipatore alettato, posizionato nel centro. Le prove sono effettuate il giorno 5/06/2018 e il sistema è mantenuto per tutta la durata della prova ad una distanza di 60 cm dal fuoco, in modo da ottenere un rapporto di concentrazione pari a 10. Per questa prova i valori di irraggiamento vengono acquisiti grazie al piranometro presente in laboratorio, e i dati sono campionati ogni 5 minuti.

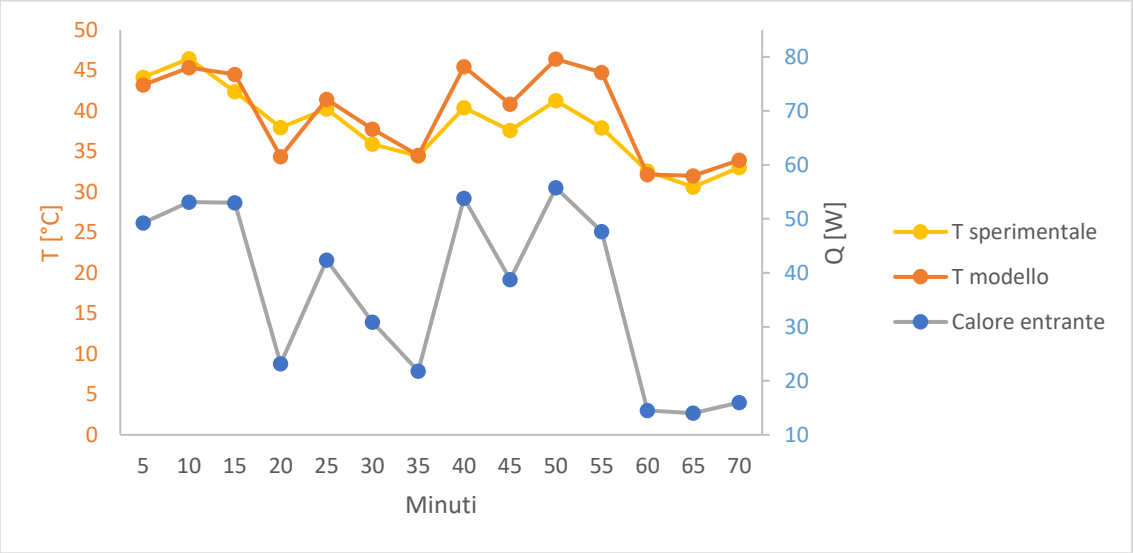


Figura 5.15 Andamento della temperatura e del calore entrante per la configurazione "Piastra con dissipatore".

A differenza del caso precendente, per questa configurazione il valore di calore entrante nel sistema subisce variazioni repentine nel corso della prova, a causa della nuvolosità del giorno in analisi che causa un oscuramento temporaneo della radiazione diretta del sole, ed è possibile notare come il valore di temperatura segua questo andamento (fig. 5.15).

A causa della difficoltà di valutare la resistenza termica del dissipatore al variare della velocità del vento, si è deciso di mantenere un valore costante e leggermente superiore a quello dichiarato dal produttore (0,4 [(K m^2)/W] contro un valore iniziale di 0,36 [(K m^2)/W]). Nonostante questa approssimazione, i valori della temperatura stimata risultano simili a quelli della temperatura misurata, con un errore medio di 2,5 °C.

La simulazione con Comsol (fig. 5.16) è effettuata nuovamente per un singolo punto di misura (il primo punto nel grafico in fig. 5.15), e indica una temperatura media sulla superficie superiore pari a 41,2°C, in linea con la temperatura stimata dal modello unidimensionale pari a 41,1 °C. In questo caso la temperatura al centro è minore a causa della presenza del dissipatore.

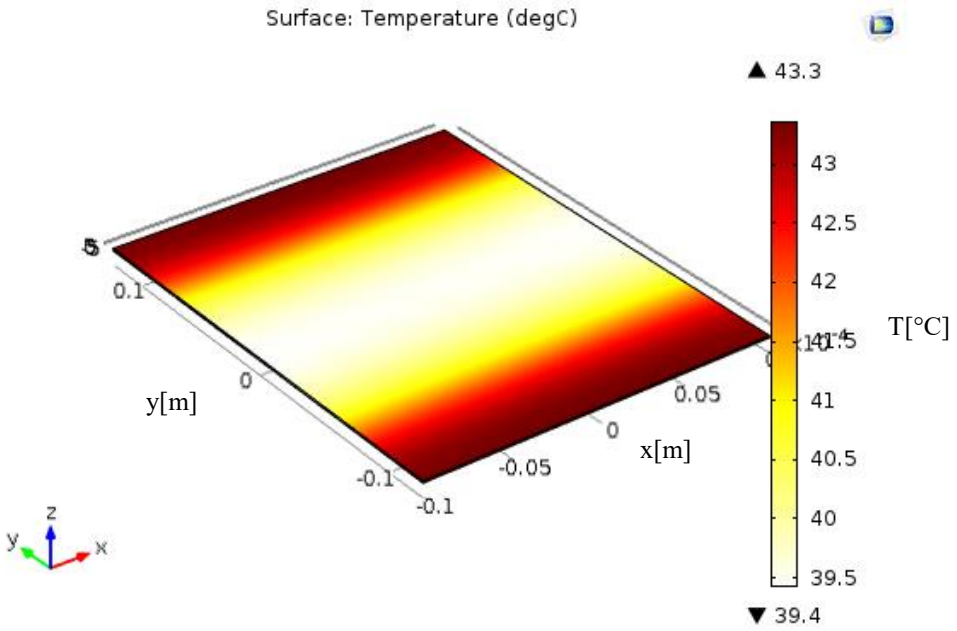


Figura 5.16 *Distribuzione della temperatura sulla piastra.*

Configurazione "piastra con celle"

In questa configurazione vengono aggiunte alla piastra otte piastrine in Tinox, per simulare l'assorbimento maggiore delle celle solari. Per questo caso sono attese temperature maggiori per via dell'assorbimento accresciuto e dell'assenza del dissipatore alettato. La simulazione è condotta nel giorno 14/06/2018, e i dati sono campionati ogni 5 minuti (fig. 5.17).

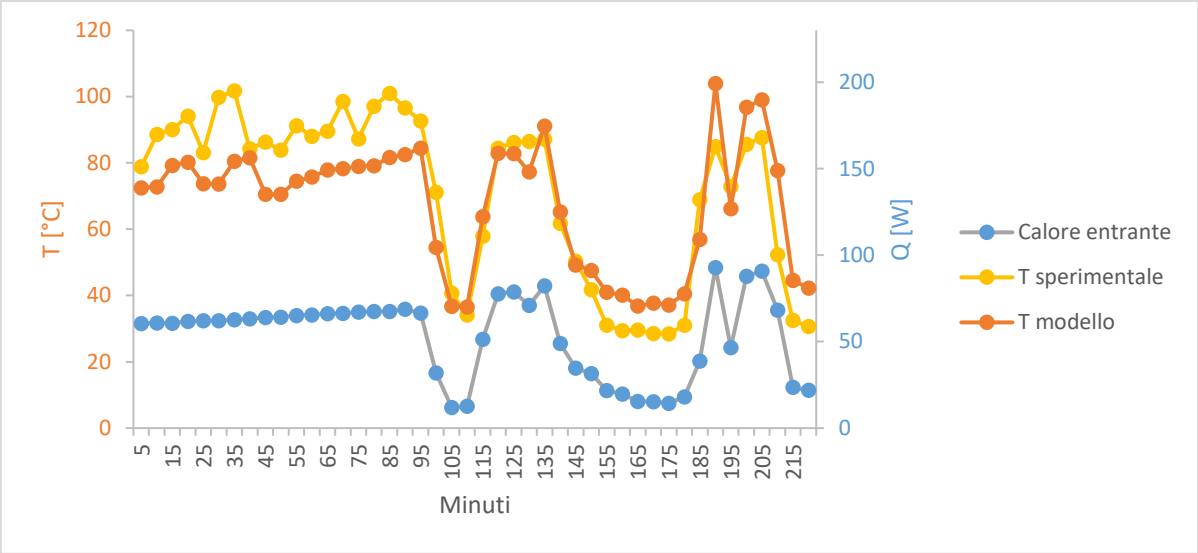


Figura 5.17 Andamento della temperatura e del calore entrante per la configurazione "Piastra con celle".

Anche in questo caso i trend della temperatura misurata e della temperatura stimata tramite il modello sono simili, con un errore medio di 11 °C. Per il modello tridimensionale in Comsol viene utilizzato il primo punto di misura, con una temperatura stimata dal modello unidimensionale pari a 72,52°C, che corrisponde alla temperatura media della superficie calcolata con Comsol pari a 70,74 °C.

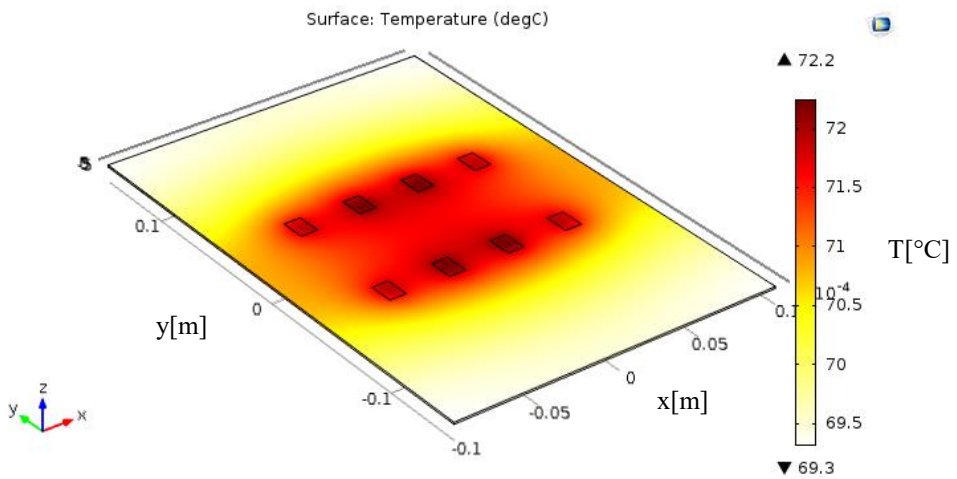


Figura 5.18 Distribuzione della temperatura sulla piastra.

Configurazione "piastra con celle e dissipatore"

Questa configurazione prevede sia la presenza delle piastrine in Tinox che del dissipatore, ed è quella che meglio rappresenta la configurazione reale con le celle solari a Perovskite che verrà installata in seguito. Le prove sono effettuate nella giornata del 19/06/2018, in prossimità del solstizio d'estate, giorno in cui il sole raggiunge l'altezza massima nel cielo e la durata del giorno è

la più lunga dell'anno. Le condizioni meteo del giorno in analisi riportano un cielo sereno con un oscuramento ad intervalli del sole dovuto a qualche nube di passaggio, come è possibile notare dall'andamento altalenante del calore assorbito dal sistema, che varia in funzione dell'irraggiamento solare (fig. 5.19).

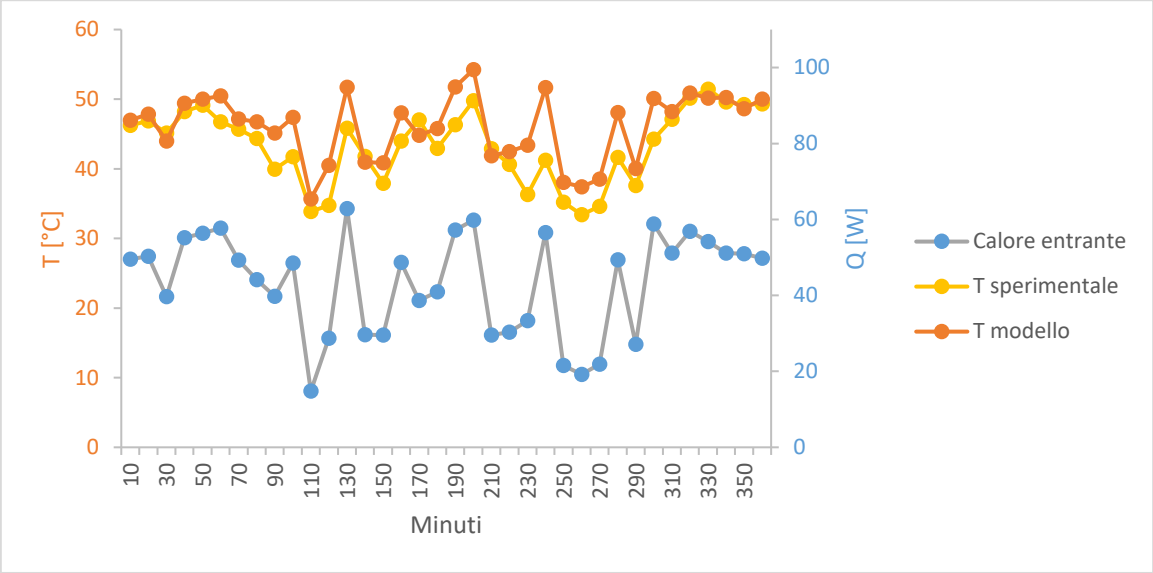


Figura 5.19 *Andamento della temperatura e del calore entrante per la configurazione "Piastra con celle e dissipatore".*

Si può notare che la temperatura supera per pochi punti i 50°C, rimanendo comunque lontano dal valore limite per le celle a Perovskite dei 70 °C. L'errore medio tra la temperatura rilevata sperimentalmente e quella di modello è pari a 3,1 °C. Anche in questo caso viene svolta una simulazione termica tridimensionale tramite Comsol, impostando come valori quelli rilevati nel primo punto di misura. La temperatura media superficiale ha un valore di 42,5°C, e coincide con la temperatura stimata dal modello monodimensionale.

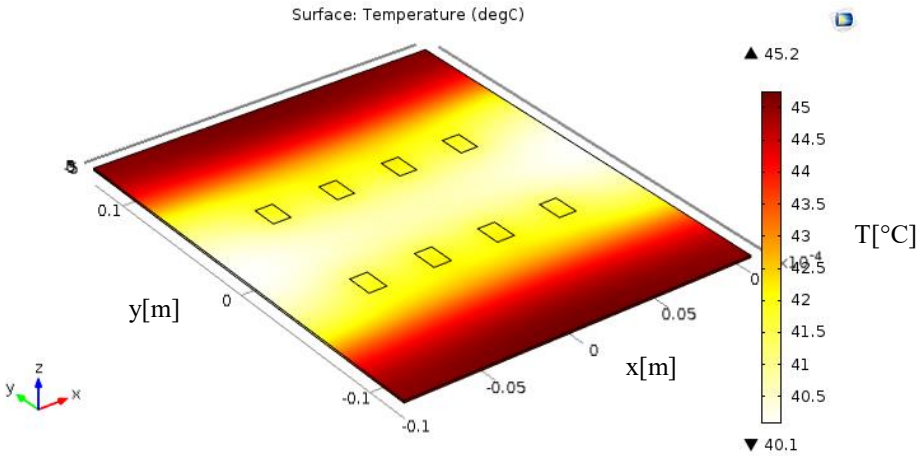


Figura 5.20 *Distribuzione della temperatura sulla piastra.*

La distribuzione di temperature rispecchia le aspettative, con una temperatura minore del centro a causa della presenza del dissipatore nella parte inferiore, e un valore leggermente maggiore in corrispondenza delle celle in Tinox.

5.6 Rilevanza del dissipatore per la resistenza termica del sistema

Per una valutazione dell'incidenza del dissipatore alettato nella dispersione del calore, viene calcolato un valore medio della resistenza termica complessiva per tutti i dati disponibili, con e senza dissipatore.

Il valore della resistenza media è dato dall'equazione:

$$R = \frac{dT}{d\Phi} \tag{5.12}$$

Questo calcolo è possibile se si assume che l'andamento della differenza di temperatura tra piastra e ambiente sia direttamente proporzionale al calore entrante nella piastra. L'ipotesi è verosimile in quanto l'incidenza del calore dissipato per irraggiamento, che ha un andamento alla quarta potenza con la temperatura della piastra, è poco incidente sul calore scambiato totale, a causa della bassa emissività dell'alluminio nel campo dell'infrarosso. Infatti, svolgendo una media della percentuale di calore scambiato per irraggiamento su tutti i valori ottenuti dalle prove sperimentali, si ricava un valore pari al 7,6%.

Riportando su un grafico i valori di calore totale assorbito dalla piastra e la differenza di temperatura piastra- ambiente, e impostando una linea di tendenza passante per l'origine, si possono ricavare i valori di resistenza termica media, che coincidono con il coefficiente angolare della retta (fig. 5.21).

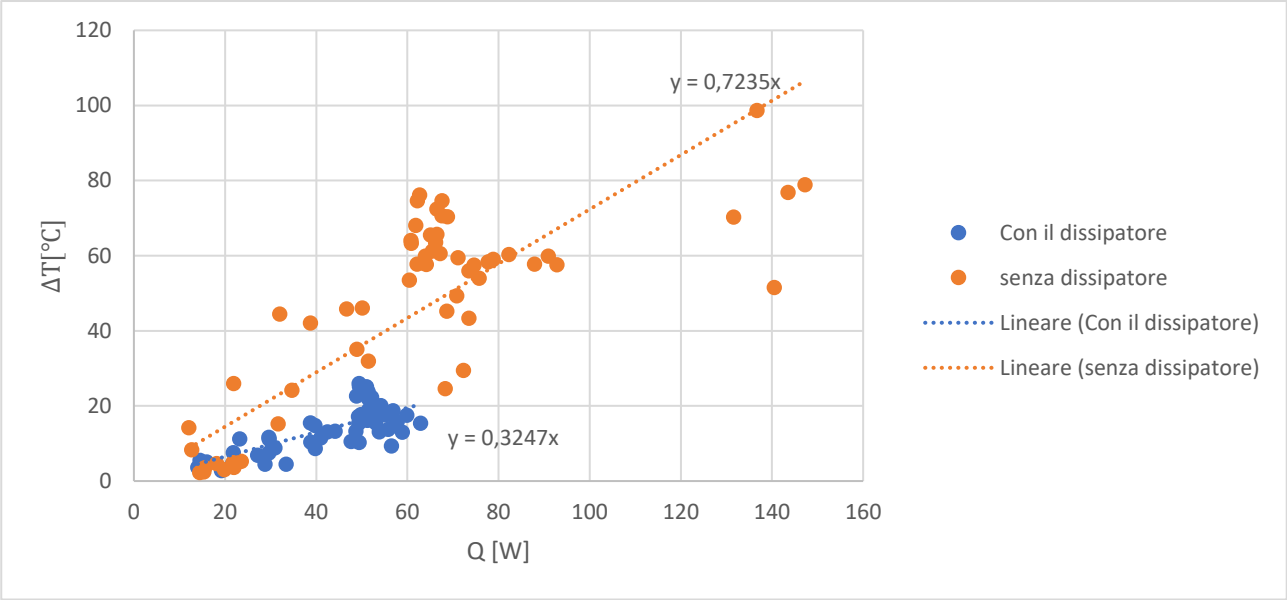


Figura 5.21 *Punti di misura suddivisi per le configurazioni con e senza dissipatore. Il coefficiente angolare della linea di tendenza rappresenta la resistenza termica media.*

I valori di calore entrante sono più elevati nella configurazione senza dissipatore a causa delle prove effettuate per rapporti di concentrazione più alti, fino a 20,68. Risulta quindi una resistenza termica media pari a R= 0,323 [K/W] per la configurazione con il dissipatore, e R = 0,724 [K/W] per la configurazione senza dissipatore. Per verificare l'attendibilità di questi valori, viene calcolato il valore del calore entrante nel sistema Q_m tramite la resistenza termica media R_m:

$$Q_m = \frac{1}{R_m}\,(T - T_{amb}) \tag{5.13}$$

Dove T e T_{amb} sono rispettivamente le temperature misurate della piastra e dell'ambiente. Il valore risultante di Q_m è quindi confrontato con quello già calcolato per il modello unidimensionale e riportato nei grafici precedenti (es. fig. 5.19).

Entrambi questi valori, ricavati per i test del 19/06 e del 14/06 sono riportati nei grafici seguenti (fig. 5.22 e 5.23):

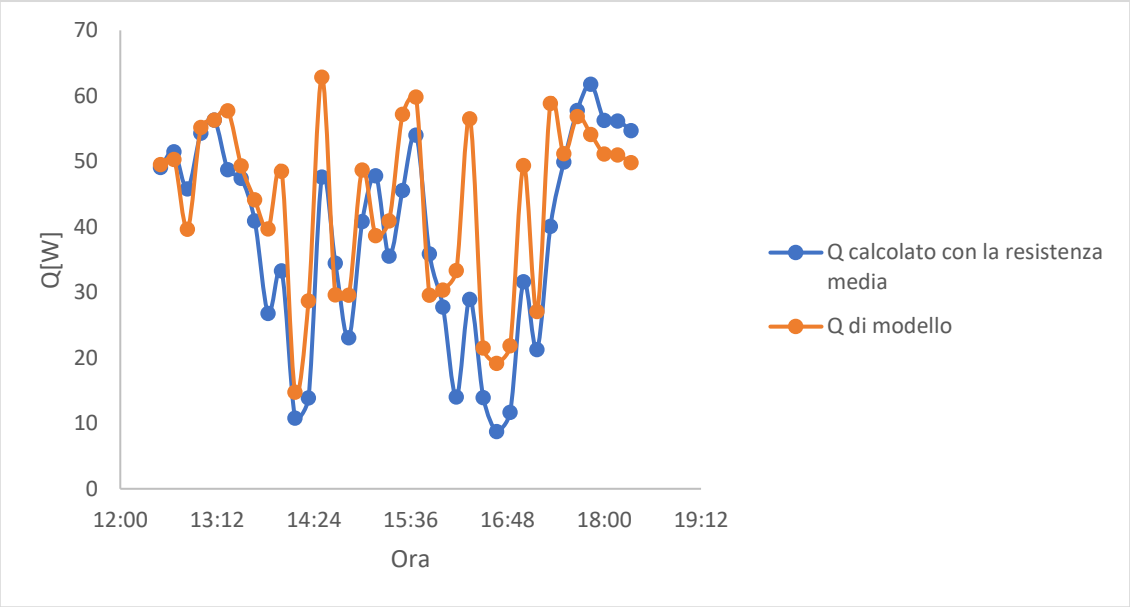


Figura 5.22 *Confronto del calore dissipato dal sistema con il dissipatore (R = 0,323 [K/W]) calcolato con la resistenza media e quello di modello.*

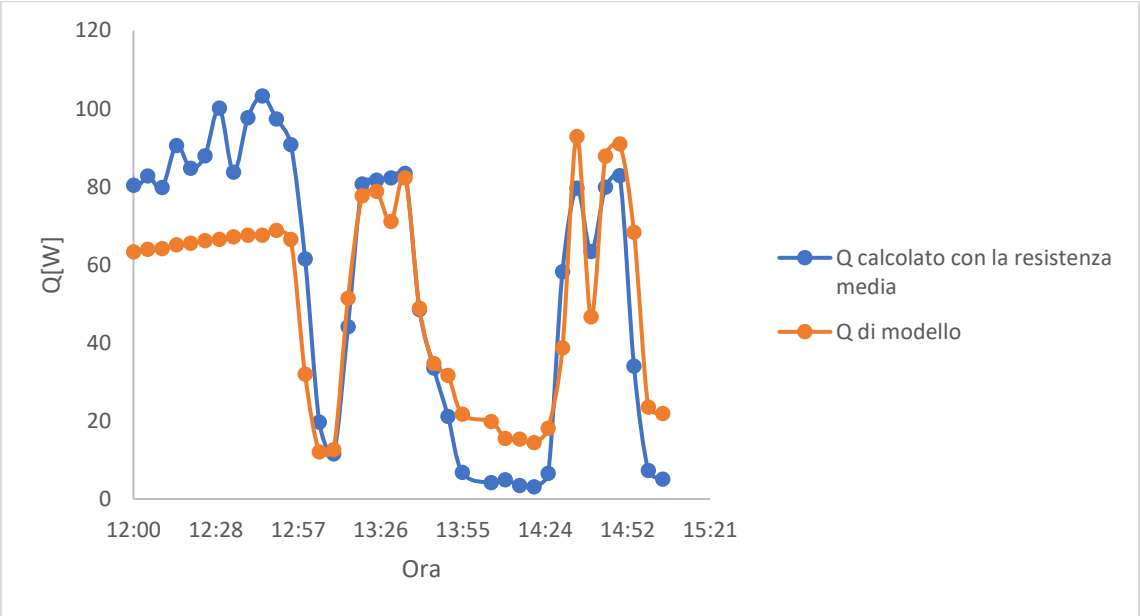


Figura 5.23 *Confronto del calore dissipato dal sistema senza dissipatore (R = 0,724 [K/W]) calcolato con la resistenza media e quello di modello.*

Gli andamenti del calore calcolato nei due modi differenti non risultano perfettamente coincidenti, a causa della perdita dell'informazione relativa alla variabilità del coefficiente convettivo nel caso del calcolo tramite la resistenza media. Tuttavia, gli andamenti sono abbastanza simili tanto da giustificare il valore calcolato della resistenza media per il caso con e senza dissipatore.

5.7 Risultati principali e limitazioni

- Analizzando i risultati delle prove sperimentali, risulta soddisfatta la condizione iniziale di mantenimento della piastra e delle celle solari al di sotto dei 70 °C, per la configurazione con la presenza del dissipatore alettato e in condizioni di pura convezione naturale. Le prove sono state svolte nei giorni a maggior irraggiamento (nei pressi del solstizio d'estate), per cui il modello implementato è da considerarsi cautelativo.
- L'ipotesi assunta per lo svolgimento della simulazione termica sull'assenza di vento, e quindi di scambio termico per sola convezione naturale e irraggiamento, risulta eccessivamente cautelativa, data la posizione elevata del concentratore solare (20m circa di altezza dal suolo). Un'assenza di vento per pochi secondi, inoltre, non comporterebbe un innalzamento eccessivo della temperatura a causa di un valore di inerzia termica del sistema non trascurabile.
- La configurazione implementata per le prove sperimentali non è ancora quella definitiva. Quando sarà disponibile il rivestimento riflettente per la superficie della piastra, infatti, l'assorbimento di irraggiamento solare della piastra verrà ulteriormente diminuito di circa il 30%. L'accoppiamento tra piastra e dissipatore, inoltre, verrà effettuato con una pasta termica più performante di quella utilizzata, con l'obiettivo di abbattere ulteriormente la resistenza termica di contatto.
- Il valore del rapporto di concentrazione utilizzato nel modello matematico è quello calcolato sperimentalmente tramite la simulazione ottica. Nella configurazione attuale è possibile un ombreggiamento parziale di una piccola porzione di piastra dovuta alla presenza del braccio di sostegno del ricevitore. Valori più precisi del rapporto di concentrazione per tutta l'estensione della piastra saranno disponibili grazie alla verifica con il sensore di irraggiamento.
- Il valore di temperatura rilevato durante le prove è quello della piastra. La temperatura delle celle solari potrebbe essere leggermente superiore, a causa di un'ulteriore resistenza termica di contatto tra le celle e la piastra.

Conclusioni

Il lavoro presente propone l'uso di un concentratore solare per rispondere alla necessità di velocizzare il test di invecchiamento delle celle fotovoltaiche a Perovskite. Ai fini del test è necessario conoscere il valore del rapporto di concentrazione per determinare l'irraggiamento a cui vengono sottoposte le celle, e controllare l'andamento della temperatura delle celle nel corso del test.

Il primo obiettivo consiste quindi nella caratterizzazione del concentratore solare Innova installato al Politecnico di Torino, per la verifica del rapporto di concentrazione su una superficie ad una distanza nota dal fuoco del paraboloide. La simulazione ottica effettuata tramite il software Comsol Multiphysics, ha permesso di ricavare l'andamento dell'irraggiamento concentrato, che si è verificato essere simile al valore ricavato tramite un calcolo geometrico. Tramite questo valore è possibile ottenere il rapporto di concentrazione conoscendo la distanza dal fuoco.

Tuttavia, la presenza di fattori non rientranti nei parametri della simulazione, come lo sporcamento della superficie riflettente del paraboloide, richiede la verifica sperimentale del valore di irraggiamento concentrato da parte di un sensore. Inoltre, a causa di un possibile ombreggiamento parziale della superficie ricevente dovuto alla presenza del braccio di sostegno del ricevitore, è utile la conoscenza della distribuzione superficiale di irraggiamento, ottenibile monitorando i valori ottenuti dal sensore per posizioni variabili lungo la superficie.

La progettazione e costruzione di un dispositivo in grado di misurare la radiazione solare concentrata è stata tuttavia resa infruttuosa dall'insorgenza di complicazioni tecniche, come la difficoltà nel valutare parametri sperimentali. Per questo motivo si è optato per l'acquisto di un sensore apposito.

Un altro aspetto fondamentale del lavoro presente è quello di garantire che durante la prova ad invecchiamento delle celle solari a Perovskite, la temperatura del sistema rimanesse sempre al di sotto del valore limite di 70 °C. Oltre a questo valore, infatti, le celle solari subiscono una degradazione tale da compromettere i risultati del test ad invecchiamento. In seguito all'analisi di diverse soluzioni per la dissipazione del calore, è stata scelta una configurazione passiva, tramite l'installazione di un dissipatore alettato e l'applicazione di una pellicola riflettente verso la radiazione solare, per limitare l'apporto di calore al sistema.

Con lo svolgimento delle prove sperimentali, si è provveduto ad assemblare il sistema e a testarlo sul concentratore in diverse configurazioni per il monitoraggio delle temperature raggiunte. I risultati ottenuti sono coerenti con il modello teorico, e per le condizioni ambientali in cui sono stati effettuati non superano mai i 60 °C nelle condizioni più sfavorevoli. Per il test di invecchiamento con le celle solari è prevista l'applicazione della pellicola riflettente (non ancora disponibile al momento delle prove), e la sostituzione dell'attuale pasta termica di accoppiamento tra dissipatore e piastra (λ = 0,65 [W/(mK)]) con una più performante. Questi risultati indicano che le condizioni al contorno imposte per la simulazione termica erano largamente cautelative. L'assenza di vento, e quindi lo scambio termico in condizioni di sola convezione naturale e irraggiamento, è un'ipotesi molto improbabile specie per la posizione del concentratore solare rialzata dal suolo di circa 20 m. Inoltre, la radiazione solare diretta difficilmente raggiunge i 1000 W/m^2 imposti, specie nei mesi estivi, quando la temperatura esterna è più alta ma la componente di radiazione solare diffusa è maggiore.

Queste condizioni indicano che per ulteriori test futuri potrebbe essere conveniente aumentare il rapporto di concentrazione oppure l'area totale occupata delle celle solari, così da accelerare l'invecchiamento e/o testare un numero maggiore di celle contemporaneamente.

Una criticità delle prove sperimentali svolte, riguarda la difficoltà nel rilevare la temperatura delle piastrine in Tinox simulanti le celle solari. L'assenza di termocoppie adatte ha condotto ad ipotizzare una temperatura delle celle simile a quella della piastra sottostante, ipotesi verosimile grazie all'alta conducibilità termica del Tinox (composto principalmente di alluminio) e all'accoppiamento alla piastra tramite una pasta termica. Queste condizioni potrebbero non essere più valide per le celle solari in Perovskite, per le quali sarebbe quindi possibile il raggiungimento di una temperatura sensibilmente superiore a quella della piastra. Si suggerisce quindi per ulteriori test futuri di inserire le termocoppie acquistate all'interno di una cella solare, per il monitoraggio delle temperature raggiunte. Nel caso la temperatura sia effettivamente più alta, una possibile soluzione sarebbe quella di inserire le celle direttamente a contatto con la superficie del dissipatore tramite degli appositi fori sulla superficie della piastra, per eliminare una delle due resistenze di contatto.

Bibliografia

- Bella Federico, Griffini Gianmarco, Correa-Baena Juan-Pablo, Saracco Guido, Grätzel Michael, Hagfeldt Anders, Turri Stefano, Gerbaldi Claudio, Improving efficiency and stability of perovskite solar cells with photocurable fluoropolymers, Science, 2016.
- Coventry Joe, Andraka Charles, Dish systems for CSP, Solar Energy 2017.
- GRATZEL MICHAEL, PARK NAM-GYU, Organometal Halide Perovskite Photovoltaics: a diamond in the roungh, World Scientific Publishing Company, 2014.
- Günther Matthias, Joemann Michael, Csambor Simon, Advanced CSP Teaching Materials, Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt.
- Hafez A.Z., Soliman Ahmed, El-Metwally K.A., Ismail I.M., Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications, Elsevier 2016.
- Incropera Frank P., DeWitt David P., Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S., Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition.
- Mesquita Isabel, Andrade Luísa, Mendes Adélio, Perovskite solar cells: Materials, configurations and stability, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Stefanovic Velimir P., Pavlovic Sasa R., Bellos Evangelos, Tzivanidisb Christos, A detailed parametric analysis of a solar dish collector, Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2018.
- Yong Shuai, Xin-Lin Xia, He-Ping Tan, “Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems,” Solar Energy, vol. 82, pp. 13–21, 2008.
- Wu SY, Xiao L, Cao Y, Li YR. A parabolic dish/AMTEC solar thermal power system and its performance evaluation. Appl Energy 2010.
- Comsol Multiphysics User’s guide.

Sitografia

- http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php.
- http://www.almecogroup.com/it/pagina/53-tinox-energy-cu.
- https://www.schott.com/borofloat/english/index.html.
- https://www.hukseflux.com/.

- http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/it/nid/209887.
- https://it.rs-online.com/web/p/dissipatori/0158540/.
- https://www.alanod.com/en/reflection/solar-reflection/.
- http://www.tecnoal.it/.
- http://smartgreenbuilding.polito.it/monitoraggio/esterno.asp.
- http://www.meteo.dfg.unito.it/.

Ringraziamenti

A termine di questo lavoro desidero ringraziare il Prof. Eliodoro Chiavazzo, Relatore, per la sua disponibilità nel seguirmi durante tutto il percorso e per i suoi preziosi consigli. Ringrazio inoltre il dott. Matteo Morciano e il dott. Matteo Fasano, Co-relatori, per l'aiuto puntuale che mi hanno fornito in ogni fase di questo lavoro, e per la grande pazienza dimostrata nei miei confronti.

Vorrei inoltre ringraziare il dott. Federico Bella, che grazie al suo lavoro ha reso possibile questa tesi, fornendo il suo supporto per ogni necessità.

Un ringraziamento speciale va al dott. Matteo Alberghini, per il suo sostegno nelle attività di laboratorio, ringrazio inoltre Maurizio Bressan e tutti i tecnici di laboratorio.

Proseguo con tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione dei progetti necessari per la tesi presente, in particolare Giuseppe Ghigo e Aldo Busso.

Ringrazio infine tutti coloro che mi sono stati di grande sostegno durante questi anni e mi hanno incoraggiato nei momenti più difficili; i miei amici, la mia famiglia e la mia ragazza Anna.