

*Progetto **STAR***
Solare Termodinamico ad Alto Rendimento

Dipartimento di Energetica “S. Stecco”

Università degli Studi di Firenze

Rapporto Intermedio
Giugno 2009

Prof. Ing. Giuseppe Grazzini

Ing. Samuele Piazzini, Ph.D.

Ing. Andrea Presciani

Indice

| | |
|---|----|
| Task 1.3 - Progettazione del sistema di monitoraggio della efficienza | 3 |
| 1. Introduzione..... | 3 |
| 2. Corpo nero | 4 |
| 2.1. Specifiche di progetto | 4 |
| 2.2. Concetti generali..... | 4 |
| 2.3. Progetto costruttivo..... | 5 |
| 2.4. Stato di avanzamento | 8 |
| 3. Camera oscura..... | 9 |
| 3.1. Specifiche di progetto | 9 |
| 3.2. Concetti generali..... | 9 |
| 3.3. Progetto costruttivo..... | 11 |
| 3.4. Stato di avanzamento | 14 |

Task 1.3 - Progettazione del sistema di monitoraggio della efficienza

1. Introduzione

Per valutare l'efficacia del sistema è necessario verificare sperimentalmente se l'energia che arriva nel fuoco del sistema di concentrazione raggiunge i livelli previsti. È previsto dalle simulazioni ottiche che lo spot si trovi su un piano orizzontale posto a 140 cm da terra e che abbia una forma simile ad un cerchio di diametro di circa 20 cm (fig. 1).

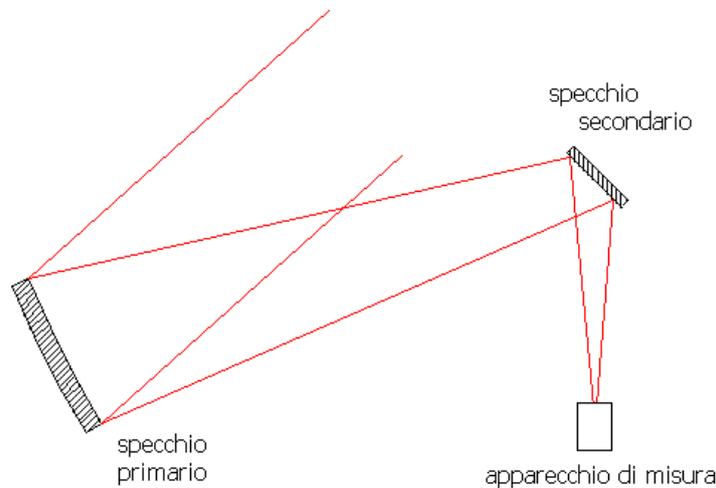


Fig. 1 – Schema di principio del prototipo.

Il monitoraggio deve rilevare la forma dello spot e la distribuzione di irraggiamento al suo interno, eventualmente anche fuori dal piano focale, per poter comprendere difetti di messa a fuoco da parte dello specchio, o comunque l'influenza dei vari parametri da cui dipende il sistema. Il monitoraggio deve anche rilevare l'efficienza globale del prototipo, definita come:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{IA}$$

dove \dot{Q}_u è la potenza radiante concentrata entro lo spot, I è la radiazione diretta (che non viene misurata direttamente, ma estrapolata a cura di IBIMET a partire dalla radiazione globale tramite correlazioni) e A è l'area dello specchio primario, che è una costante del sistema e può essere misurata.

Un apparecchio che riesca a compiere tutte queste misurazioni contemporaneamente verrebbe ad essere molto complesso; è stato preferito progettare due apparecchiature: la prima, cui si farà riferimento in seguito come "corpo nero", misura la potenza totale \dot{Q}_u , per cui permette di calcolare l'efficienza; la seconda apparecchiatura, chiamata nel seguito "camera oscura", si occupa di misurare la distribuzione di irraggiamento all'interno dello spot, fornendo quindi una misura differenziale, e non assoluta, della radiazione concentrata.

Il fatto che le apparecchiature siano separate è giustificato dall'uso che molto probabilmente ne verrà fatto. Infatti, in una prima fase di messa a punto del prototipo, sarà importante conoscere la distribuzione dell'irraggiamento, al fine di verificare i vari settaggi, mentre in una seconda fase diventerà preponderante l'esigenza di misurare l'effettiva efficienza del prototipo.

2. Corpo nero

2.1. Specifiche di progetto

Il corpo nero deve soddisfare le seguenti specifiche:

- il suo ingombro in altezza non deve superare gli 85 cm;
- la sua "bocca" deve essere di diametro 40 cm, per poter contenere lo spot anche qualora esso dovesse rivelarsi più esteso delle stime;
- deve essere rimuovibile dalla postazione e movimentabile in altezza.

2.2. Concetti generali

Quando la luce colpisce una superficie opaca, una piccola parte dell'energia luminosa viene riflessa e la maggior parte viene assorbita, cioè interamente convertita in energia termica.

La misura di \dot{Q}_u è dunque la misura di una potenza termica; essa può essere compiuta attraverso due metodologie:

1. misurando il salto di temperatura cui è soggetta una portata di fluido riscaldato da

\dot{Q}_u ed applicando la relazione semplificata:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c \Delta T$$

2. misurando il tempo necessario affinché una certa massa, solida o fluida, si riscaldi, secondo la relazione:

$$\dot{Q}_u = mc \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

La seconda metodologia è di più facile realizzazione, perché comporta la misurazione di massa, temperatura e tempo, invece della misura di portata, che in genere è abbastanza complicata e coinvolge strumenti di misura sofisticati per poter raggiungere precisioni accettabili.

Il corpo nero si configura dunque come un sistema che cede calore ad un fluido (che sarà acqua) di cui verrà monitorata la variazione di temperatura durante il tempo. La relazione alla base della procedura di misura sarà dunque la seguente:

$$\dot{Q}_u - \dot{Q}_{loss} = mc \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

dove \dot{Q}_{loss} è un termine dovuto al fatto che comunque, se il corpo nero è a temperatura superiore all'ambiente, tende a cedergli energia per irraggiamento e convezione. La forma del corpo nero dovrà dunque essere tale da minimizzare queste perdite. In particolare, la forma del corpo nero sarà quella di una cavità, in cui l'aria ristagna; pertanto, nell'analisi successiva si considereranno già ridotte al minimo le perdite per convezione e ci si concentrerà sulla riduzione di quelle per irraggiamento, che sono proporzionali al fattore di vista tra la superficie del corpo nero ed il cielo.

La progettazione della cavità prende inizio dalla considerazione che un semplice cilindro il cui *aspect ratio* (lunghezza/diametro) sia superiore a 5-6 rappresenta già una buona approssimazione del corpo nero; nel caso in esame è però impossibile costruire un cilindro con un simile *aspect ratio* perché ciò contrasta con le specifiche di progetto. È stata dunque studiata una soluzione che suddivide il cilindro in sotto-cavità con l'introduzione di setti e alette; in figura 2 sono mostrate le configurazioni analizzate. Le prestazioni in termini di efficienza associata al fattore di vista sono state valutate tramite un software di ray tracing, in cui ogni superficie emette energia radiante nell'infrarosso in maniera lambertiana; l'energia associata ai raggi che riescono ad uscire dalla bocca del corpo nero quantifica le perdite per radiazione della cavità.

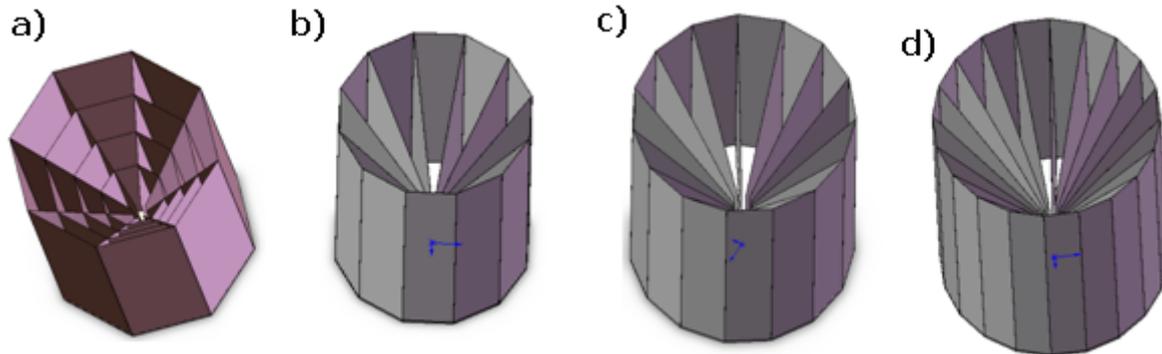


Fig. 2 – Configurazioni analizzate

L'analisi ha mostrato che una configurazione che preveda solo alette invece che alette e setti circolari non è sfavorita da un punto di vista dell'efficienza mentre è preferibile da un punto di vista economico, in quanto viene utilizzato meno materiale. Infatti si considerino i casi a) e c) in figura 2: nel caso a) si hanno 24 cavità ottenute dividendo il cilindro con 3 setti circolari e 8 settori angolari, nel caso c) si hanno semplicemente 15 cavità realizzate tramite alette. L'analisi mostra che l'efficienza è pari in entrambi i casi al 95,0%, ma le cavità sono in numero minore nel caso c).

La configurazione assunta come definitiva è la d), che con 20 alette porta ad un'efficienza "ottica" del 95,9%; la cavità sarà costruita in rame a causa della sua ottima conducibilità termica (386 W/mK).

La temperatura media dell'acqua circostante alla cavità sarà misurata tramite termocoppie realizzate in laboratorio con filo di rame e costantana e tarate separatamente; questo permetterà di abbassare l'incertezza di misura (che per termocoppie commerciali è dell'ordine di 1°C) all'ordine di qualche decimo di grado.

2.3. Progetto costruttivo

La cavità alettata viene inserita in un contenitore più grande in vetroresina e l'intercapedine viene riempito d'acqua, come mostrato in figg. 3-4. La cavità alettata è realizzata con lamiera di rame da 3 mm per il fondo e per la flangia superiore, con lamiera da 1 mm per le alette e le pareti laterali. Una verifica agli elementi finiti, i cui risultati sono riportati in figura 5, mostra che la pressione idrostatica, che è l'unico carico che grava sul componente, induce una tensione inferiore ai 25 MPa. Considerando che la tensione di snervamento del rame varia a seconda della composizione del materiale e dai trattamenti termici che ha subito¹, ma che in ogni caso non è mai inferiore a 54 MPa, questo comporta

¹ P. Andreini, *Manuale dell'ingegnere meccanico*, 2° ed., Hoepli, Milano 2005

un coefficiente di sicurezza pari almeno a 2,16, per cui la resistenza è verificata. La reazione vincolare verticale dovuta alla spinta di Archimede è stata valutata in 610 N. La tenuta viene realizzata tramite un O-ring, mentre la compressione tra le due flange è realizzata tramite comuni clip metalliche (vedi dett. fig. 4).

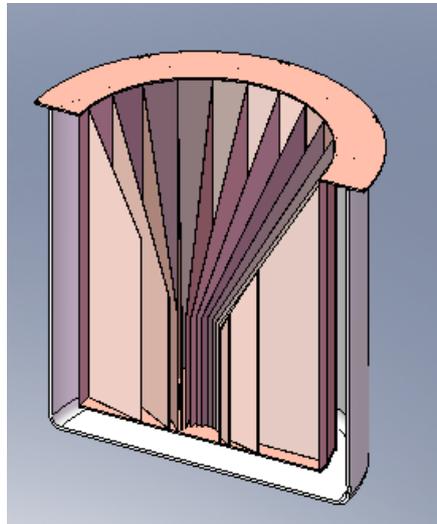


Fig. 3 – Corpo nero e contenitore in vetroresina: vista 3D.

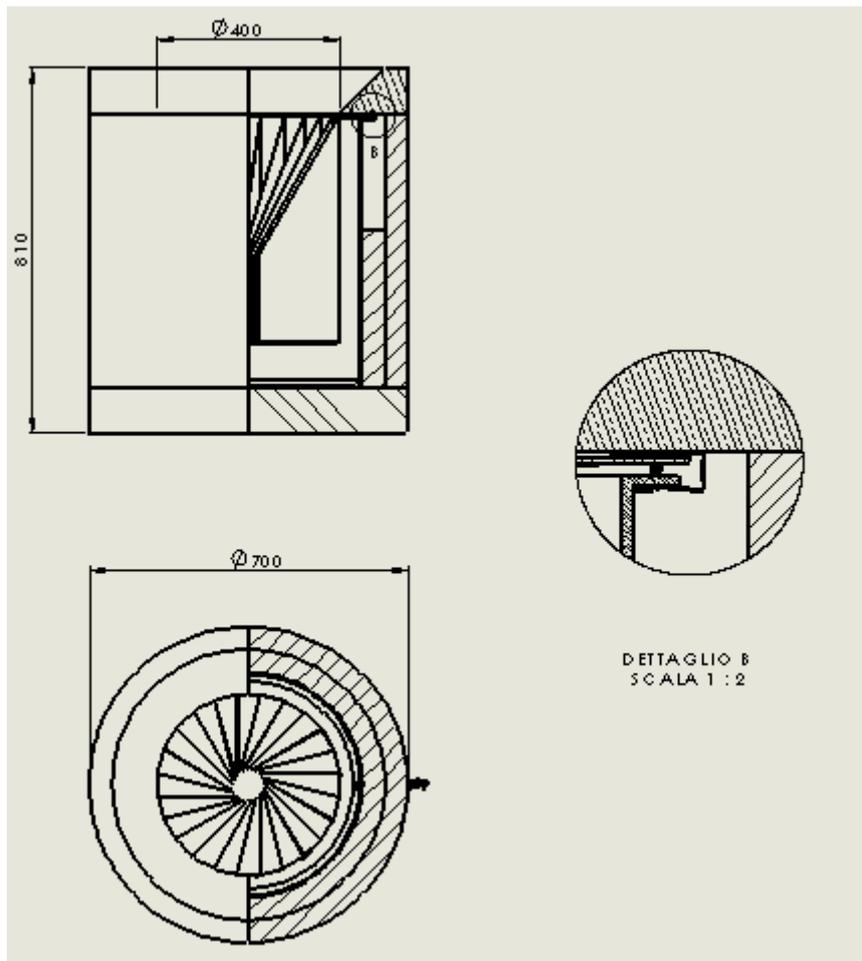


Fig. 4 – Corpo nero: disegno tecnico.

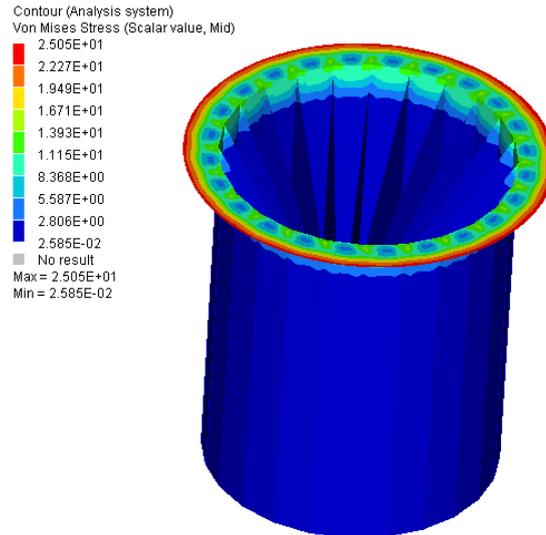


Fig. 5 – Verifica agli elementi finiti (misure in MPa)

Per quanto riguarda le termocoppie, è stato scelto di disporre in numero sovrabbondante (fig. 6), in modo da poter scegliere come punto di misura le più rappresentative (o una media delle più rappresentative). Esse saranno disposte prevalentemente attorno alla cavità alettata, ma alcune verranno disposte anche vicino al contenitore in vetroresina. Lo schema elettrico è mostrato in figura 7.

Infine, per movimentare in verticale il corpo nero, è stato adottato un transpallet elevatore a forche, movimentabile manualmente (fig. 8).

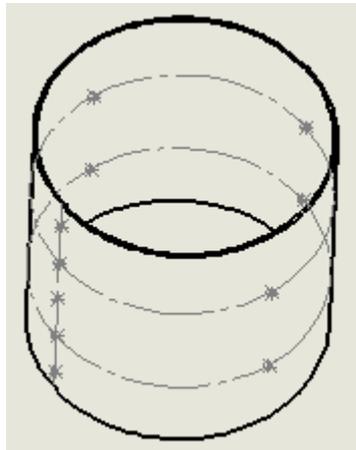


Fig. 6 – Schema della disposizione dei punti di misura intorno alla cavità alettata.

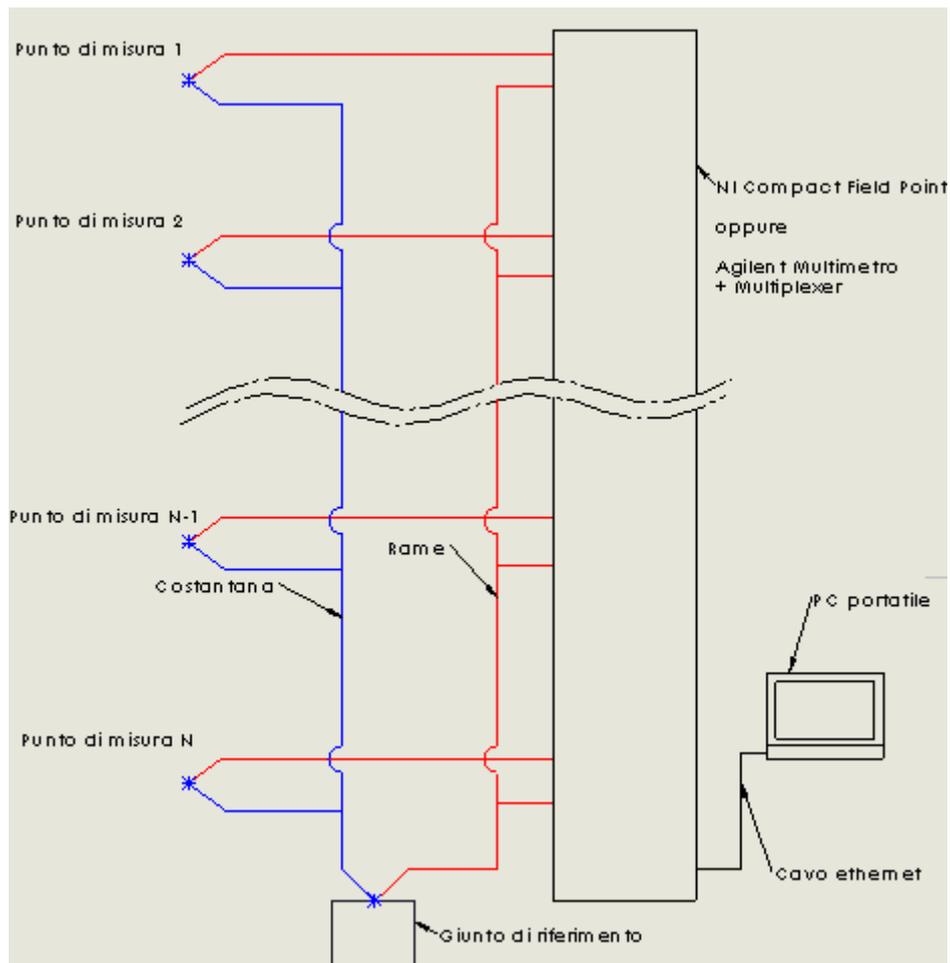


Fig. 7 – Schema elettrico della misura di temperatura.

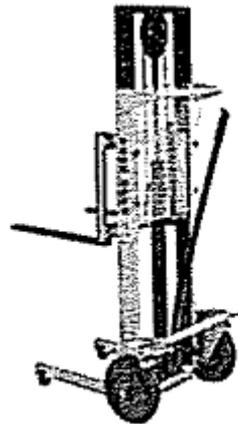


Fig. 8 – Transpallet elevatore a forche.

2.4. Stato di avanzamento

Tutti i componenti descritti al paragrafo precedenti, tranne alcuni di dettaglio, sono già stati acquisiti dal Dipartimento di Energetica; la tabella 1 mostra una valutazione dei costi sostenuti per la realizzazione. Rimane da assemblare il sistema e tarare gli strumenti e la catena di misura.

| Articolo | Q.tà | Importo (IVA e trasporto incl.) |
|--|------|---------------------------------|
| Contenitore vetroresina diam. 50 cm alt. 60 cm | 1 | € 96,00 |
| Manufatto in rame "corpo nero" | 1 | € 1.500,00 |
| Spola costantana per termocoppie | 1 | € 243,96 |
| Cavo rame/costantana per termocoppie | 20 m | |
| Disco polistirolo diam. 70 cm alt. 10 cm | 2 | € 21,60 |
| Feltro di lana di roccia | 5 mq | € 47,52 |
| Cavo elettrico quadripolare | 30 m | € 34,50 |
| Vernice spray colore nero | 5 | € 78,30 |
| Scheda acquisizione segnali elettrici | 1 | € 2.440,00 |
| Computer portatile Toshiba Satellite | 1 | € 740,00 |
| Carrello elevatore | 1 | € 1.920,00 |
| Totale | | € 7.121,88 |

Tab. 1 – Stima dei costi per la realizzazione del corpo nero.

3. Camera oscura

3.1. Specifiche di progetto

La camera oscura è soggetta alle seguenti specifiche:

- la sua "bocca" deve essere di 60x60 cm;
- la radiazione deve essere mappata con una risoluzione minima di 2,5x2,5 cm;
- deve essere movimentabile in maniera che il piano dove viene misurata la radiazione possa trovarsi a tutte le altezze tra 90 e 190 cm da terra.

Quest'ultima specifica è facilmente ottemperabile utilizzando lo stesso carrello elevatore di cui al paragrafo 2.3.

3.2. Concetti generali

Esistono diversi modi di monitorare la radiazione concentrata sul piano focale: quelli presi in considerazione in questo studio sono i seguenti:

1. utilizzare una serie di sensori fotoelettrici, nello specifico:
 - a. celle fotovoltaiche per alte concentrazioni;
 - b. celle fotovoltaiche standard;
 - c. fotodiodi;
2. disporre un elemento diffondente sul piano focale e scattare una fotografia dell'immagine che si viene a formare sul diffusore (fig. 9).

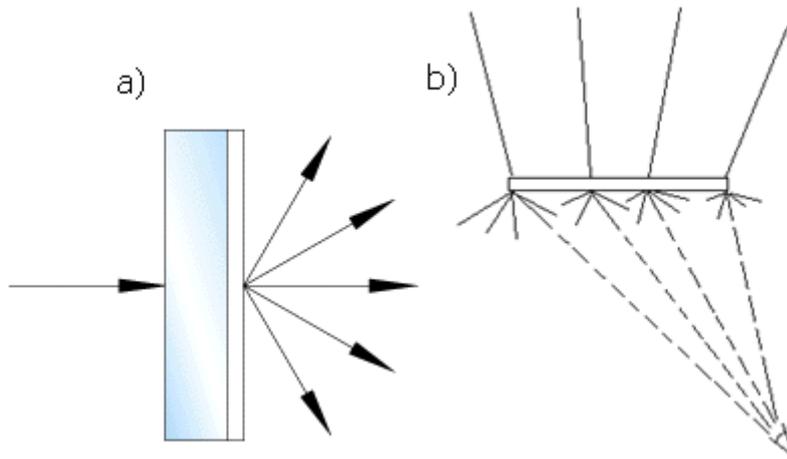


Fig. 9 – Schema del sistema con diffusore ottico: a) funzionamento del diffusore; b) schema di principio del dispositivo di mappatura.

La prima soluzione è senz'altro quella che creerebbe minori difficoltà: infatti, le celle fotovoltaiche a concentrazione, oltre ad avere ottimi rendimenti, hanno una corrente che è praticamente una funzione lineare dell'irraggiamento, per cui questa costituirebbe una misura quantitativa, oltre che qualitativa e, se venissero disposte tutte queste celle su una matrice bidimensionale nel piano focale, questo permetterebbe di eliminare il corpo nero perché dalla potenza in uscita dalle celle si potrebbe risalire direttamente alla potenza incidente. Tuttavia, le specifiche sull'ampiezza della "bocca" dello strumento e sulla risoluzione portano a dover disporre almeno 576 celle. Questo fatto ha reso quest'ipotesi non percorribile a causa dei costi proibitivi (la miglior offerta ricevuta ammontava a 110,40 €/cella); inoltre l'acquisizione separata di 576 segnali elettrici avrebbe comportato diversi problemi. È stata valutata anche l'idea di allestire una striscia mobile simile ad uno scanner o ad un radar, ma le soluzioni considerate non hanno portato ad una riduzione sufficiente dei costi.

L'uso di celle fotovoltaiche standard avrebbe abbassato i costi, ma avrebbe richiesto una schermatura con un filtro ottico neutral density e soprattutto, essendo le dimensioni delle celle fotovoltaiche molto standardizzate esse sono di gran lunga più grandi della minima risoluzione richiesta dalle specifiche.

I fotodiodi invece, essendo sensori con una superficie inferiore al cm^2 , non sarebbero soggetti a questo tipo di problemi; per questo è stata allestita una sperimentazione preliminare per valutare accuratamente la fattibilità di questo approccio. È stato dunque realizzato il circuito in figura 10, tipico dei luxmetri, la cui caratteristica principale è che cambiando il valore della resistenza che in figura è comandata dallo switch, è possibile cambiare il campo di misura dello strumento.

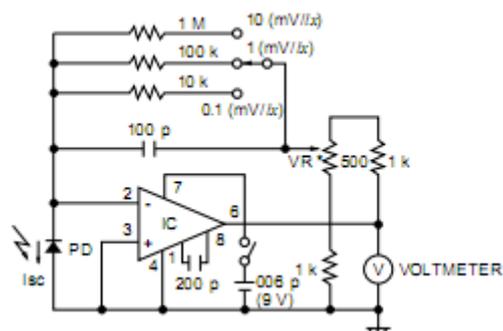


Fig. 10 – schema del circuito per un fotodiodo.

L'attività sperimentale ha da una parte mostrato che in effetti la saturazione del fotodiodo può essere evitata cambiando la resistenza, ma d'altro canto ha evidenziato una forte non-linearità dello strumento quando viene sottoposto a luce concentrata (realizzata tramite una comune lente d'ingrandimento, con un fattore di concentrazione stimato intorno a 300).

Per quanto detto finora, la soluzione più percorribile, semplice ed anche economica è quella di utilizzare un diffusore ed una macchina fotografica; il diffusore infatti può essere realizzato usando della semplice carta lucida da disegnatore. In questo caso la radiazione deve essere attenuata da un filtro neutral density, che è reperibile in commercio sotto forma di fogli come attrezzatura da telescopi. Anche in questo caso è stata condotta una sperimentazione preliminare: la fotografia di prova mostrata in figura 11 mostra bene le conclusioni sul modo in cui deve essere realizzata la camera oscura:

1. stampando una serie di punti sulla carta lucida è possibile avere dei punti di riferimento per associare ad ogni pixel la posizione reale del punto di misura;
2. la luce concentrata (che in figura ha forma di cometa) è ben riconoscibile;
3. le increspature dei fogli devono essere evitate perché possono portare a errori di misura;
4. la camera oscura deve essere ben sigillata: infatti, la luce nella parte superiore della fotografia è originata da un bordo chiuso male.

Infine, è emersa la necessità di raffreddare il filtro perché la radiazione concentrata può danneggiarlo, anche se in maniera non irreversibile.

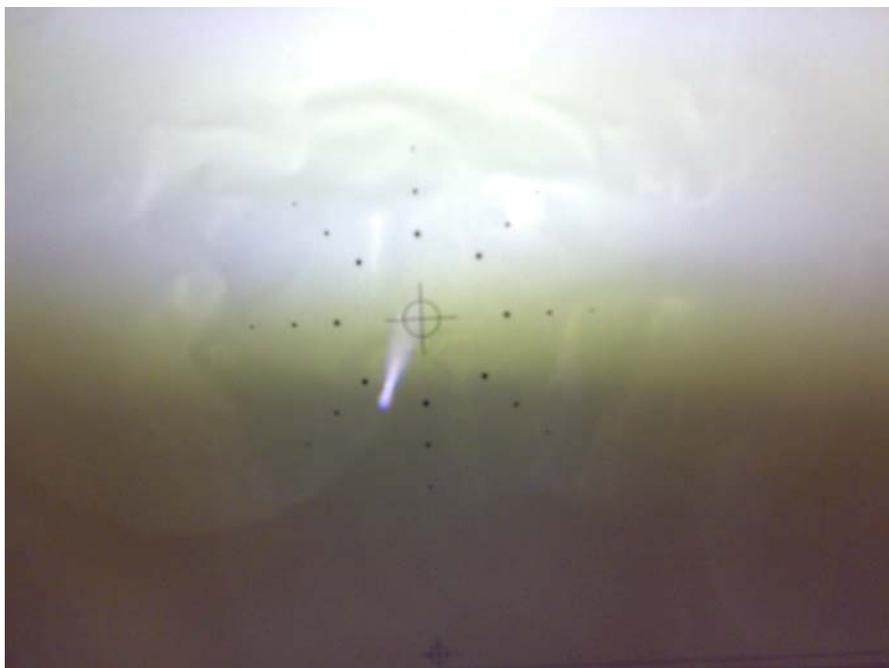


Fig. 11 – Esempio di immagine rilevata col sistema con diffusore e macchina fotografica.

3.3. Progetto costruttivo

La macchina fotografica selezionata per essere inserita nella camera oscura è una Nikon D60, che è una reflex alimentabile e comandabile da remoto; in questo modo essa può essere inserita nella camera oscura e comandata elettronicamente, senza accesso manuale. È stato necessario anche acquisire un obiettivo grandangolare in quanto

l'obiettivo normalmente in dotazione non permetteva di rispettare la specifica sull'ingombro inferiore a 60x60x90 cm, già menzionata al paragrafo 3.1.

La camera oscura (fig. 12) è costituita da un'intelaiatura in tubi quadri metallici (acciaio o alluminio) su cui sono fissate delle lamiere, che fungono da pareti (fig. 13); in due pareti sono praticati due fori per l'aerazione: su questi fori si innestano due tubi flessibili, che vengono piegati, affinché possa entrare l'aria ma non la luce. All'estremità di uno dei tubi è fissato un piccolo ventilatore, in modo da garantire la circolazione dell'aria ed il raffreddamento dei componenti. In un'altra parete è praticata un'apertura per poter inserire la macchina fotografica (fig. 14); anche qui è praticato un foro per far passare i cavi elettrici, nonché quelli di un sensore di temperatura per controllare che la temperatura all'interno della camera oscura non raggiunga valori superiori ai 40 °C, che potrebbero danneggiare la macchina fotografica.

Inoltre, in figura 13, si possono anche notare i piedini che andranno ad appoggiare sulle forche del transpallet; essi hanno lo stelo filettato, in modo da poter essere regolabili in altezza e quindi permettono di "mettere in bolla" l'apparecchiatura.

La figura 15 invece mostra come venga disposto il filtro ottico, insieme alla carta lucida; esso viene adagiato su un telaio composto da tondini d'acciaio e viene mantenuto teso da dei pesi (in colore scuro) attaccati ai lembi. Infine, questo telaio viene coperto da un controtelaio piano (fig. 16), che chiude la camera oscura ed impedisce ulteriori movimenti del filtro.

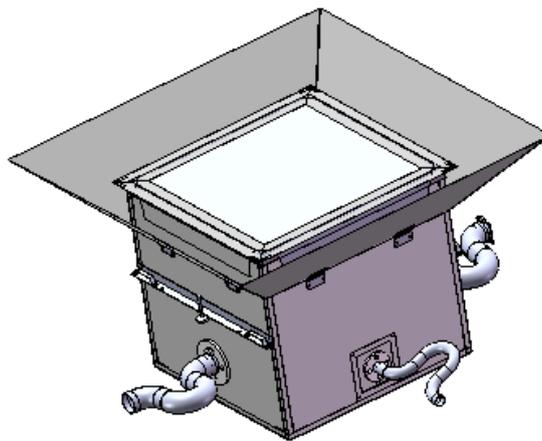


Fig. 13 – Camera oscura: vista d'insieme.

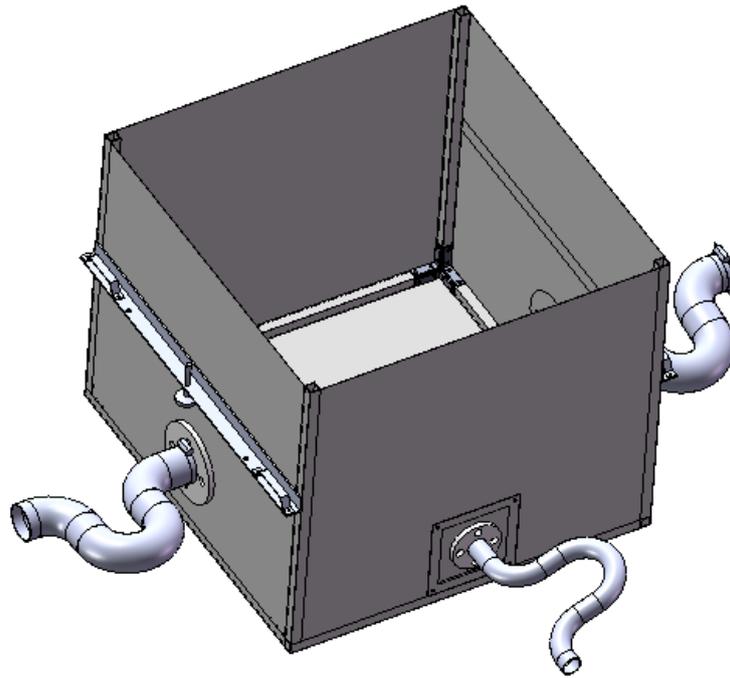


Fig. 14 – Camera oscura: interno.

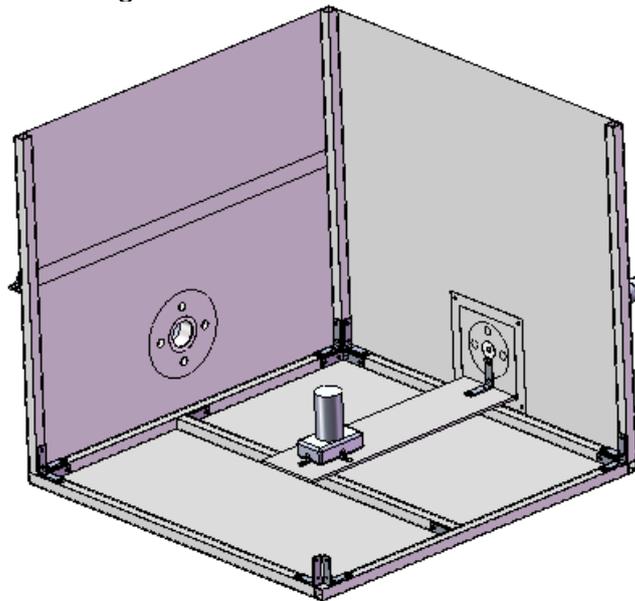


Fig. 14 - Camera oscura: posizionamento della macchina fotografica.



Fig. 15 – Camera oscura: telaio per filtro ottico.

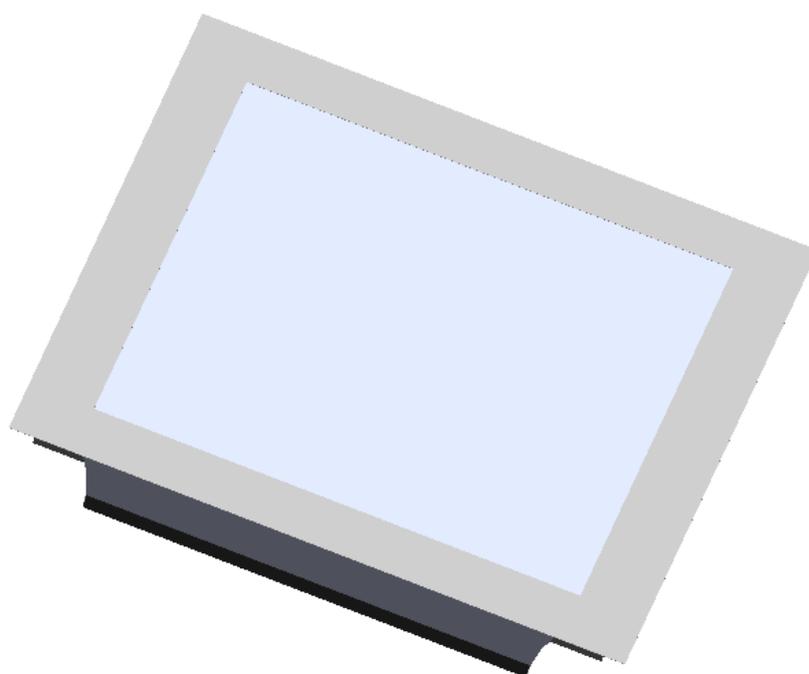


Fig. 16 – Camera oscura: controtelaio per filtro ottico.

3.4. Stato di avanzamento

A differenza del corpo nero, in questo caso diverse soluzioni hanno dovuto essere valutate, sia da un punto di vista tecnico che economico che di fattibilità, il che ha richiesto tempo. Pertanto, il progetto descritto al paragrafo precedente può considerarsi completo, ma non ancora definitivo a tutti gli effetti. Dunque, non tutti i componenti sono stati ancora acquisiti; nonostante ciò, il progetto è stato stilato col preciso obiettivo di poter acquisire con due sole ordinazioni tutti i componenti di interesse e di poter assemblare la camera oscura senza richiedere una commessa ad un'officina, con conseguenti risparmi economici (e, auspicabilmente, anche di tempo) sulla manodopera.

La stima dei costi è mostrata in tabella 2.

| Articolo | Q.tà | Importo (IVA e trasporto incl.) |
|--------------------------------------|------|---------------------------------|
| Filtro solare AstroSolar 117x117 cm | 1 | € 240,00 |
| Macchina fotografica Nikon D60 | 1 | € 1.091,40 |
| Obiettivo grandangolare | 1 | |
| Adattatore da rete universale | 1 | |
| Manufatto in acciaio "Camera oscura" | 1 | € 700,00 |
| Carrello elevatore | 1 | € 1.920,00 |
| Totale | | € 2.031,40 |

Tab. 2 – Stima dei costi per la camera oscura.

Task 4.1 – Selezione del sito

La selezione del sito d'impianto del prototipo dimostrativo è stata effettuata concordemente con tutti gli altri soggetti coinvolti nel progetto STAR, e non solo con IBIMET come originariamente previsto dalla flow-chart del progetto. Il sito designato è una delle due terrazze dell'Osservatorio di Arcetri, a Firenze, di cui la figura 17 mostra una vista pianta dell'esistente, su cui è disegnata la posizione dei binari e del ricevitore.

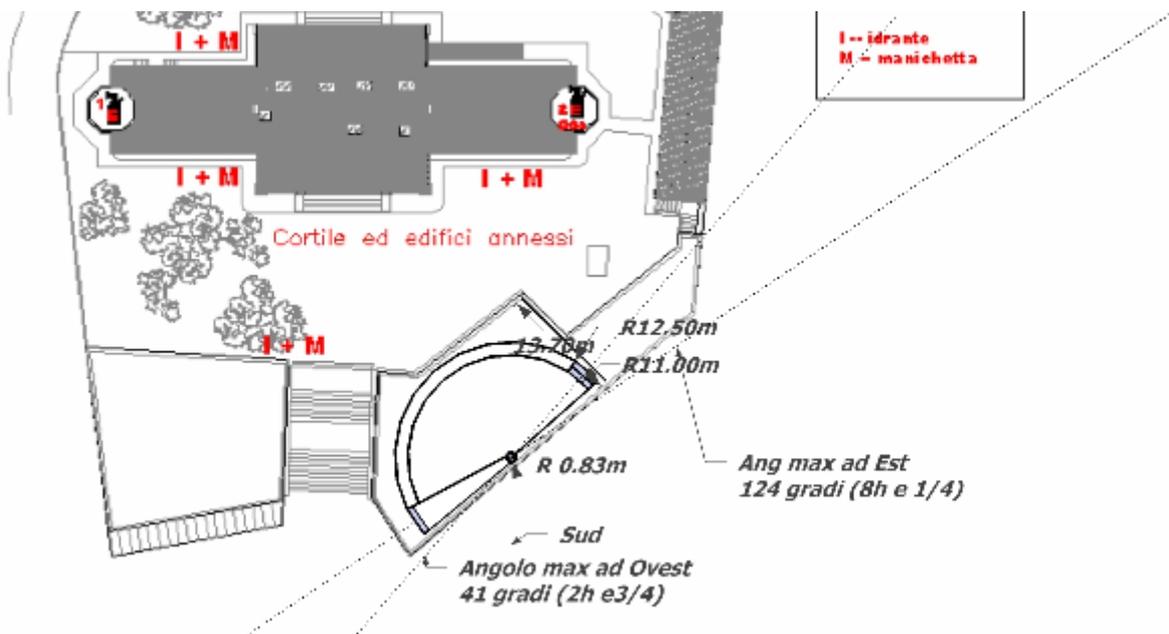


Fig. 17 – Pianta del sito selezionato (realizzata da P. Salinari, INAF).