

STAR – Solare Termodinamico ad Alto Rendimento

CNR - INOA

Francesco D'Amato, Lisa Gambicorti, Francesca Simonetti, Alessandro Zuccaro Marchi

Rapporto finale sulle attività svolte 08/05/2008-27/11/2009

Sommario

Considerazioni generali sulle attività	1
Scelta del tipo di concentratore	1
Scelta della localizzazione e vincoli logistici.....	2
Rotaie.....	3
Carrello e telaio per gli specchi.....	5
Torre	6
Definizione del secondario.....	8
Allineamento degli specchi	9
Simulazione della focalizzazione	10
Misure.....	21
Commenti	25
Prospettive.....	26
Ringraziamenti	27

Considerazioni generali sulle attività

Il ruolo di INOA, al di là della parte manageriale del Progetto, è consistito nella partecipazione alle seguenti attività:

Definizione del tipo di concentratore da realizzare

Studio delle configurazioni ottiche

Simulazione delle caratteristiche ottiche dei sistemi candidati

Progettazione della meccanica del concentratore

Montaggio ed allineamento

Misure

Scelta del tipo di concentratore

Il concentratore realizzato si caratterizza per due aspetti salienti: movimentazione e adattività degli specchi.

I campi solari attuali hanno numerosi pregi, ma anche dei difetti, legati principalmente all'efficienza degli specchi nel corso della giornata. In pratica, l'orientazione degli specchi viene effettuata intorno a posizioni fisse sul terreno, il che vuol dire che l'angolo di incidenza della luce solare rispetto alla normale agli specchi, nel corso della giornata, può

assumere valori maggiori di 45° . In questo caso, la superficie efficace degli specchi si riduce fino anche a metà. INAF ha proposto alcune soluzioni per eliminare questo problema. Dopo attenta verifica, è stato scelto di realizzare un binario semicircolare su cui muovere un carrello recante gli specchi. Il movimento di avanzamento lungo il binario è tale che, nel sistema di riferimento solidale con il carrello, l'utilizzatore è fermo, e il sole si muove solo in direzione verticale. Inoltre, l'utilizzatore è collocato ad una certa altezza (oppure uno specchio di rinvio è collocato ad una certa altezza). In questo modo, è facile verificare che l'effetto dell'angolo di incidenza è fortemente ridotto.

Il metodo di adattività che, in linea teorica, si presenta più efficiente, è quello di partire da uno specchio piano, e di deformarlo fino ad assumere la forma voluta. Questo metodo richiede che gli sforzi necessari alla deformazione siano esercitati in modo quanto più possibile uniforme, su uno specchio con caratteristiche omogenee. Per funzionare al meglio, richiede un numero minimo di tre deformazioni, ovvero nelle due direzioni parallele ai lati, e rispetto alla diagonale.

In alternativa, si può modificare l'involuppo di specchi rigidi piani, o toroidali con raggi di curvatura opportuni. Se si scelgono specchi piani, il fattore di concentrazione si riduce considerevolmente, a meno di utilizzare tessere delle dimensioni dell'immagine focalizzata del sole minima possibile, che per il concentratore realizzato è di 16 cm. Con specchi toroidali si ha una situazione intermedia, che consente l'uso di specchi dell'ordine del metro quadrato.

Una volta accertata la possibilità di disporre di specchi toroidali, grazie all'ingresso di Ronda High Tech nella partnership, è stato scelto di perseguire, come obiettivo realizzativo principale, la realizzazione di uno specchio primario composto da un mosaico di otto specchi rigidi. Le dimensioni di ciascuno specchio sono $60 \times 160 \text{ cm}^2$, per un totale di 7.68 m^2 , disposti a formare un pannello di 3.2 m di base e 2.4 m di altezza. Il pannello, oltre a traslare lungo il binario, può ruotare in alzo e in azimut. I singoli specchi sono sostenuti da un giunto cardanico, che consente l'orientazione, comandata da due attuatori lineari. Questi attuatori cambiano di fatto l'involuppo della superficie complessiva, dando origine all'adattamento dello specchio primario.

In parallelo vengono condotti gli studi per la corretta realizzazione di uno specchio adattivo vero e proprio, di dimensioni $120 \times 160 \text{ cm}^2$.

Nel caso degli specchi primari intrinsecamente adattivi, il problema di selezionare in anticipo una curvatura delle superfici non esiste, in quanto tutti gli specchi hanno la possibilità di variare i raggi di curvatura in un intervallo sufficientemente ampio. Per gli specchi rigidi occorre trovare, per le curvature, un compromesso dettato in prima istanza dalla geometria del sistema. Il capitolo successivo verte proprio sulle dimensioni del dimostratore.

Scelta della localizzazione e vincoli logistici

In seguito ad una approfondita discussione sui vari aspetti dell'attività, e sulle disponibilità logistiche, è stato deciso di collocare il dimostratore su una terrazza dell'Osservatorio Astrofisico di Arcetri. Nella foto satellitare seguente, la terrazza è quella in basso a destra, davanti alla quale sono parcheggiate le autovetture.



Nella figura precedente, il nord è verso l'alto. Quindi la terrazza è adatta per misure dall'alba fino a circa le tre pomeridiane. In inverno, questo intervallo è ridotto, nel senso che il sole diventa visibile intorno alle otto del mattino, a causa delle colline ad est.

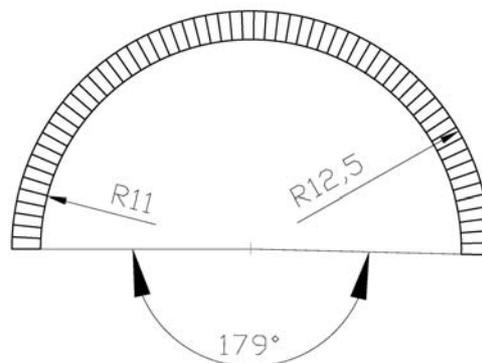
Le dimensioni del dimostratore sono state influenzate dalla collocazione del sistema. Il raggio massimo del binario risulta essere di 12 m, a fronte dei 25 necessari per la corretta messa a fuoco di un sistema reale.

La focale più idonea è di 17 metri, il che richiede una torre alta circa 6 metri. Questo fatto è molto importante, perché l'effetto della variazione di focale dipende dall'angolo di deviazione. Se il bersaglio da colpire è all'altezza di circa 20° dall'orizzonte (come è il caso del secondario, rispetto al primario), l'angolo massimo di deviazione, che si ottiene alle 12:00 (solari!) del 21 giugno, a Firenze è di 50° . All'alba e al tramonto il sole è a 0° (quindi l'angolo di deviazione è 20°), mentre in due momenti della giornata è all'altezza della torre (angolo di deviazione 0°).

Dalle considerazioni fatte in precedenza, abbiamo stimato come compromesso migliore, per la curvatura nel piano verticale, una focale di 17.6 m (raggio di curvatura 35.2 m).

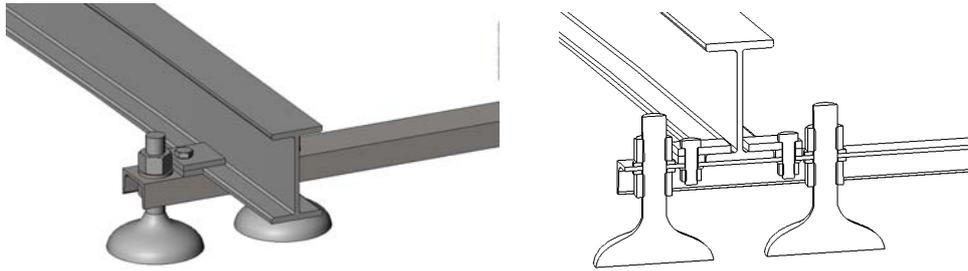
Rotaie

Il binario deve avere lo schema della figura.



Per la realizzazione sono state utilizzate travi in ferro IPE80, calandrate ai due raggi di curvatura richiesti (binari interno ed esterno). Le travi sono state giuntate tra loro con piatti di ferro calandrati, e montate su traversine.

Per la regolazione dell'altezza, in modo da compensare la pendenza della terrazza, sono stati utilizzati dei piedi calanti, secondo lo schema della figura.



Per ogni traversina ci sono due coppie di piedi, a cavallo della rotaia. Ciò è stato scelto per due motivi: a) ridurre la sezione della traversina, visto che con due piedi immediatamente vicini alla rotaia la deformazione della traversina è minima; b) ridurre il picco di carico sul pavimento. Questo secondo aspetto è cruciale, visto che il montaggio non viene fatto sul terreno, ma su un solaio.

Per il montaggio è stato individuato prima di tutto il centro di rotazione, che ha fatto da riferimento per tutto il concentratore. Si tratta di uno spezzone verticale di tubo, fissato alla ringhiera (vedi figura).



Nel lavoro sono stati impiegati un distanziometro laser (precisione a $2\sigma \pm 3$ mm), per verificare la distanza delle traversine dal centro ed il raggio di curvatura dei binari, ed una

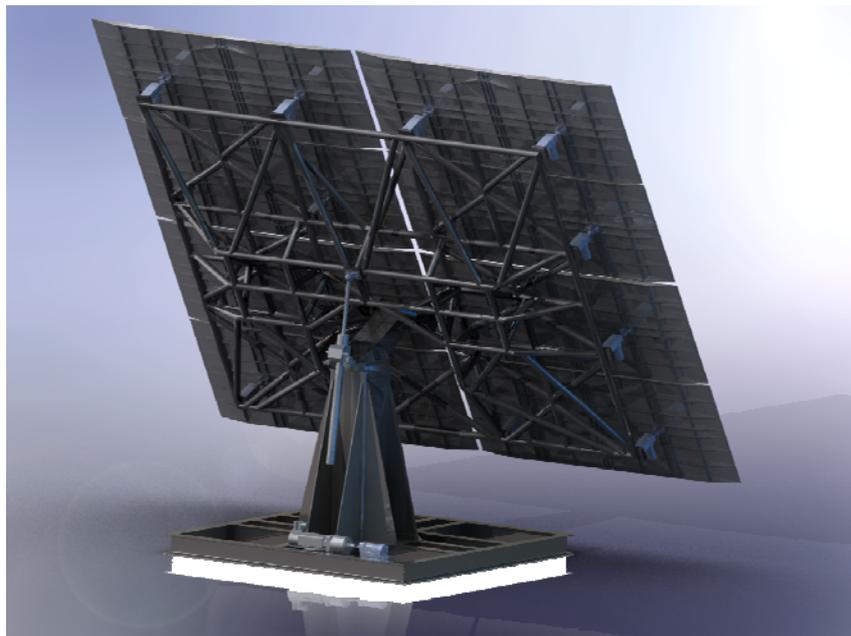


livella ad acqua, per assicurare la planarità del binario. Con i bulloni di regolazione dei piedi la traversina è stata regolata in altezza. In questo modo l'errore sulla planarità si mantiene ad un millimetro su tutta la rotaia, mentre con una livella a bolla (o una livella laser, basata su una bolla), la propagazione degli errori porta almeno ad un centimetro di indeterminazione. La figura seguente mostra la rotaia montata.



Carrello e telaio per gli specchi

INOA ha curato, con la collaborazione del Dip. di Meccanica, la realizzazione del carrello e del telaio per reggere gli specchi. L'insieme di questi due oggetti è visibile nella figura seguente, che riporta il rendering del disegno cad.



Il carrello deve soddisfare ai requisiti di leggerezza, rigidità, semplicità di montaggio, e deve ospitare tutti i dispositivi relativi alla orientazione intorno all'asse verticale, ed alla traslazione. A questo scopo, un motore comunica il movimento, tramite una cinghia dentata, all'unica ruota motrice. Questa ruota è l'unica delle quattro a non essere montata su di un ammortizzatore. Una serie di regolazioni permette di orientare gli assi delle ruote verso il centro di rotazione, e di livellare le ruote l'una rispetto alle altre. Il carrello reca delle barre antiribaltamento che, in caso di bisogno, si impegnano sotto la parte piatta della rotaia. Il telaio deve essere leggero e quanto più rigido possibile. Inoltre deve recare tutti gli agganci per aggarrarsi all'asse di rotazione orizzontale (che determina l'elevazione), e per reggere

ed orientare gli specchi. Dettagli del carrello e del telaio sono riportati nelle figure seguenti.



Sul carrello sono montati anche i dispositivi elettromeccanici per il controllo di tutti i motori. L'alimentazione ed i segnali di controllo giungono tramite cavi, contenuti in una catena portacavi, situata appena fuori dalle rotaie, sul lato interno.

Torre

La torre è formata da una base, a forma di parallelepipedo, chiusa da pannelli di legno verniciato bianco, con una porta e due finestre sulle pareti verticali, ed uno sportello sul tetto. Questo sportello consente di sollevare lo specchio secondario al suo posto e di far arrivare la radiazione sul sistema di misura. Chiudendolo, la strumentazione all'interno rimane protetta.

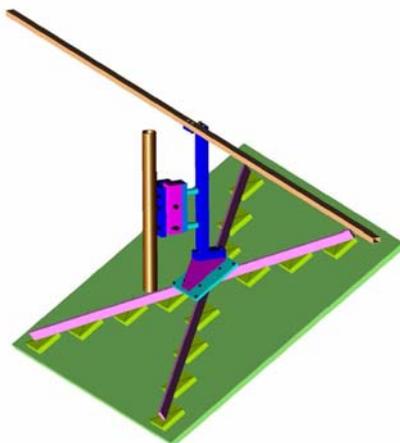
Dalla parte posteriore della base si alza la torre vera e propria, fatta di tubi Innocenti da impalcature, che reca in cima il sostegno del secondario. Tale torre deve rispettare alcune caratteristiche:

- deve essere rigida
- deve comprendere un sistema di carrucole per facilitare il montaggio del secondario
- non deve interferire né con il movimento del secondario né con la radiazione incidente

Le figure che seguono mostrano le fasi della costruzione ed alcuni dettagli.



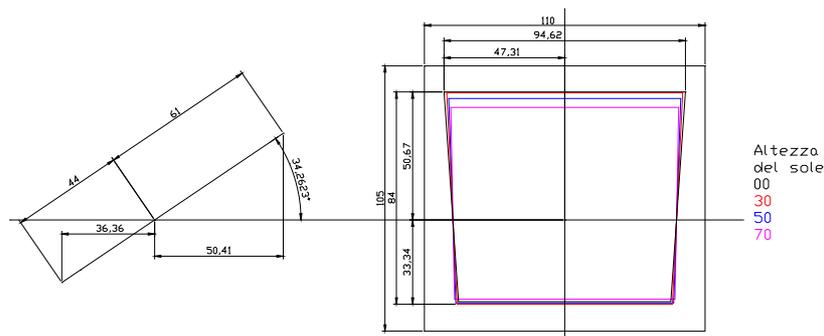
Il sistema di aggancio del secondario deve consentire la regolazione dell'asse di rotazione, in modo che sia verticale, e sia sulla verticale del centro del binario. Lo schema costruttivo e la realizzazione pratica sono mostrati nelle figure successive. Nella seconda si nota il sistema di ritenuta di sicurezza, nel caso il sostegno dello specchio dovesse rompersi. Occorre tenere presente che lo specchio secondario può comportarsi da vela, al pari del primario.



Per la movimentazione del secondario il sistema più intuitivo è quello di utilizzare un motore, con un riduttore di giri ed un encoder per la posizione. Tale sistema, che è poi lo stesso che aziona il carrello, richiede i componenti elettromeccanici, dei supporti, l'alimentazione elettrica ed un cavo di segnale in cima alla torre e del software di gestione. Un sistema alternativo è quello di utilizzare dei tiranti vincolati al carrello. In pratica, il carrello, con il suo movimento lungo il binario, guida il secondario. I tiranti sono realizzati in filo da pesca da 0.7 mm, con un carico di rottura di circa 26 kg. Questa soluzione si è rivelata compatibile con le esigenze del dimostratore, anche se, per un sistema pratico, con un secondario significativamente più grande, va riconsiderato l'impiego di un motore.

Definizione del secondario

Dato che il dimostratore comprende un solo modulo di specchi, anche il secondario avrà delle dimensioni ridotte. In teoria, c'è un effetto da considerare: se il modulo è centrato rispetto al concentratore, ovvero se il suo centro geometrico è nel piano verticale che comprende il sole ed il fuoco, allora il secondario rimanderà semplicemente i raggi in basso. Se il primario è fuori dal piano di simmetria, ovvero stiamo simulando uno degli altri moduli, il secondario (che al momento consideriamo costituito da uno specchio piano), devia il fascio verso il basso, ma non in direzione verticale. Di fatto per provare, con un solo secondario piano, varie posizioni del primario nella gradinata del concentratore, occorrerebbe un secondario di dimensioni ragguardevoli (es. 3 x 1 m²). Per ovviare a ciò, data la natura dell'attività (ricerca e sperimentazione sul campo, invece che progetto industriale), abbiamo deciso che il secondario sarà orientato sempre verso il primario, quale che sia la posizione del primario, e quindi rimanderà sempre il fascio verso il basso, in direzione verticale. Abbiamo simulato la geometria del concentratore, per stabilire le dimensioni e l'orientazione del secondario.



La figura precedente mostra invece come cambia l'immagine del sole sul secondario, quando si consideri il sole come una sorgente puntiforme. Al fine di tenere conto anche della divergenza dei raggi solari, e di qualunque altro effetto perturbativo dovesse verificarsi, le misure del secondario sono state fissate in 130 (Larghezza) x 110 (Altezza) cm². L'inclinazione del secondario rispetto al piano orizzontale è di 34.26°.

Allineamento degli specchi

L'allineamento del sistema ottico ha richiesto numerose fasi, legate sia agli aspetti puramente ottici del problema, sia alla codifica della posizione degli attuatori.

Per iniziare, il telaio portaspeschi è stato posto in posizione verticale, con la normale in direzione radiale.

Per eseguire questa operazione, è stato montato sul telaio uno specchio piano da 25 mm di diametro. Un fascio laser rosso, orizzontale, proveniente dal centro di rotazione, all'altezza del centro dello specchio, è stato usato come leva ottica. Il telaio è stato orientato fino a far tornare il fascio laser nella sorgente. Una volta posizionato il telaio in questa posizione, sono stati tarati due fine-corsa, uno per la rotazione in alzo e l'altro per la rotazione in azimut.

Quindi sono stati montati gli specchi. Ciascuno specchio è stato orientato parallelamente al telaio, sfruttando lo stesso metodo precedente, con la differenza che lo stesso specchio è stato usato per vedere il fascio riflesso. Un esempio della procedura è visibile nella figura. Sul cavalletto è stata montata una livella laser, ritarata con una livella ad acqua. Il transpallet è stato utilizzato per gli specchi più alti.



Una volta orientati in questo modo, gli specchi si presentavano come nella figura seguente.



Nella figura è evidente che ci troviamo in presenza di specchi concavi, che però non sono

disposti in modo da formare una superficie continua. Dopo l'allineamento, la situazione si è modificata come nella figura successiva.



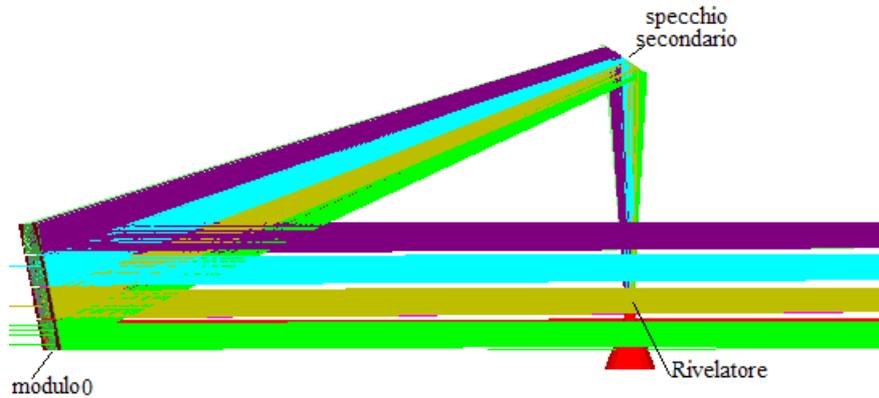
Simulazione della focalizzazione

Un concentratore reale è composto da tanti moduli come quello realizzato per il dimostratore, disposti su più file e colonne, come la gradinata di uno stadio. In particolare, una colonna sarà lungo il piano di simmetria del sistema, quel piano verticale comprendente il secondario ed il sole, mentre le altre saranno sempre più fuori simmetria. Con il nostro dimostratore, è possibile simulare più moduli della riga più in basso di questa ipotetica matrice. Per far ciò, è sufficiente spostare il carrello avanti o indietro, rispetto alla condizione di simmetria, della giusta quantità. In teoria, se il secondario fosse uno specchio piano, valido per tutti i moduli, dovrebbe avere una forma strana, tipo una cravatta a farfalla. In realtà, il secondario può essere composto da più parti, ciascuna in relazione ad un particolare modulo. Per semplicità, abbiamo deciso di avere un secondario piccolo, da utilizzare con qualunque collocazione del carrello, al solo scopo di riflettere la luce in arrivo verso il basso. Il montaggio descritto in precedenza è stato concepito proprio con questo intento.

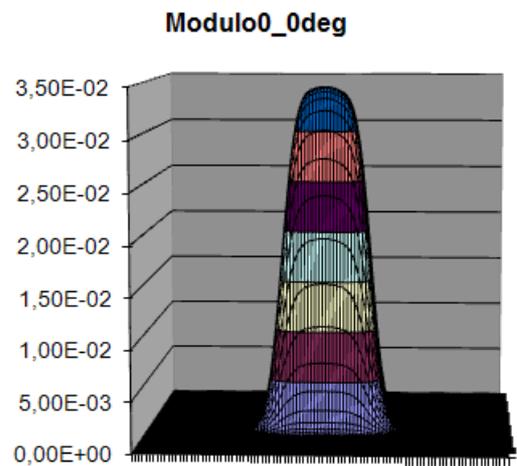
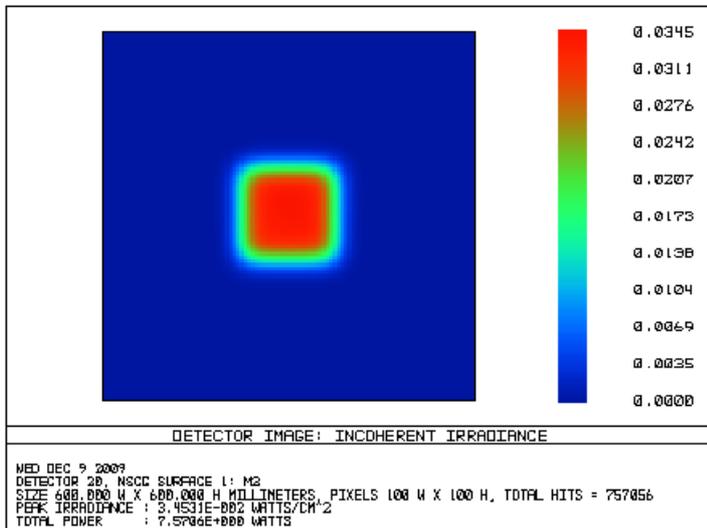
Abbiamo quindi simulato l'effetto della concentrazione per quattro posizioni del modulo (centrale, I, II e III colonna), a quattro altezze del sole (0° , 30° , 50° , 70°). Abbiamo preso come bersaglio una superficie, posta nel fuoco nominale, di $60 \times 60 \text{ cm}^2$. I grafici ottenuti sono mostrati nel seguito, con la opportuna legenda.

Per ogni posizione del modulo, ed altezza del sole ci sono tre figure, una che riporta lo schema ottico, le altre l'immagine nel fuoco, in piano e con una vista tridimensionale. Per efficienza si intende il rapporto tra i raggi incidenti su un rivelatore di $60 \times 60 \text{ cm}^2$, e quelli incidenti sullo specchio primario, trascurando la perdita dovuta alla riflettività degli specchi. In questo calcolo rientrano anche i raggi persi negli interstizi tra uno specchio e l'altro, visibili nelle figure.

Simulazione della configurazione del modulo centrale a 0°. Efficienza sul rivelatore 95%.

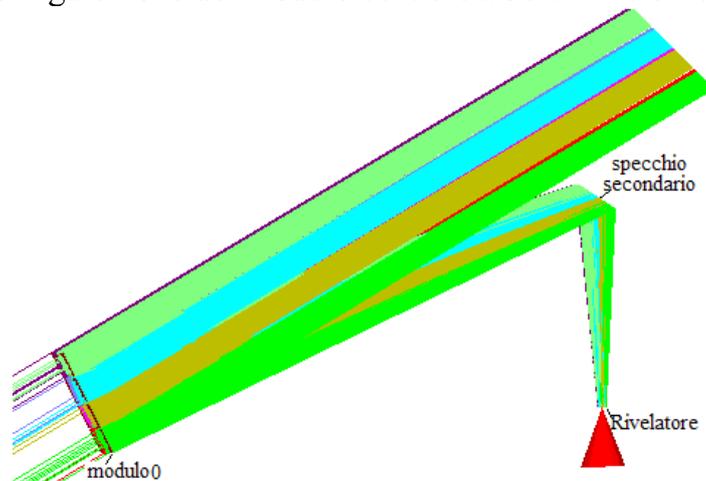


Soluzione singolo modulo centrale, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 0°

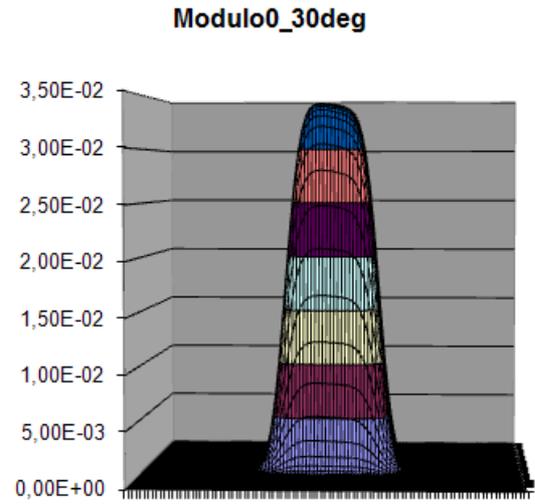
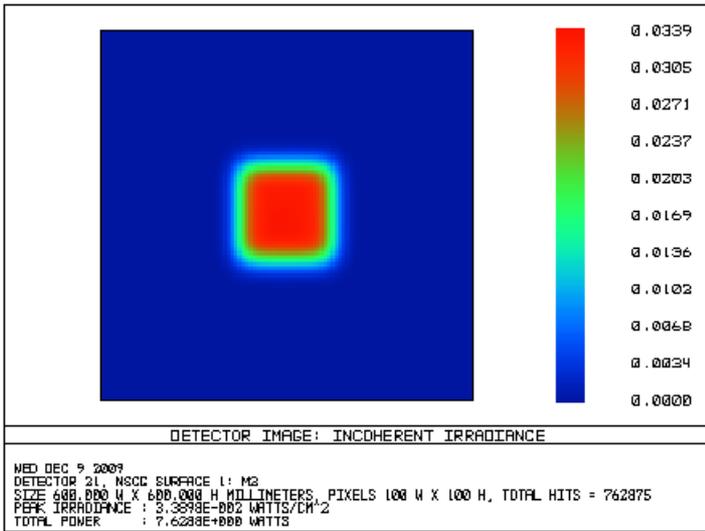


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

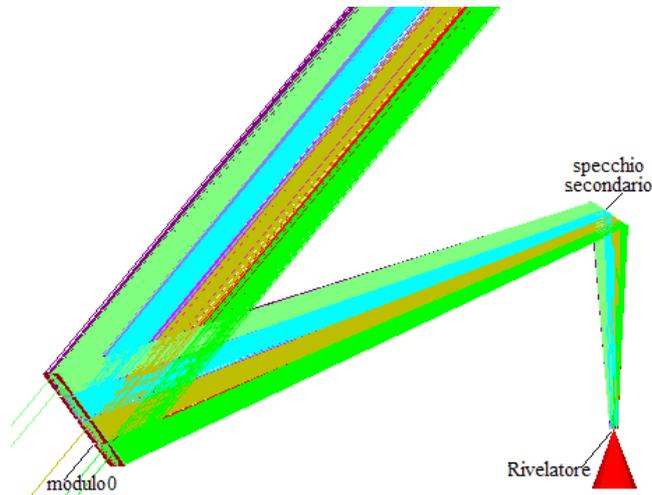
Simulazione della configurazione del modulo centrale a 30°. Efficienza sul rivelatore 95%.



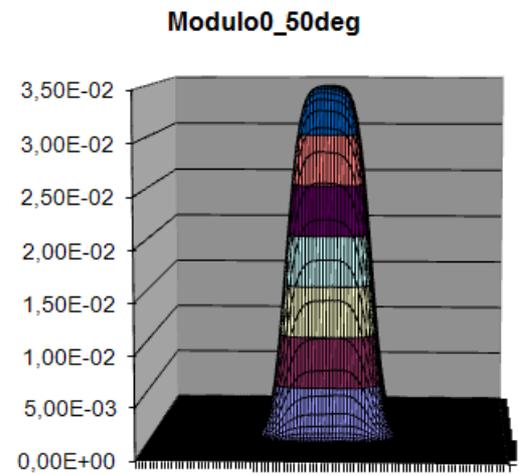
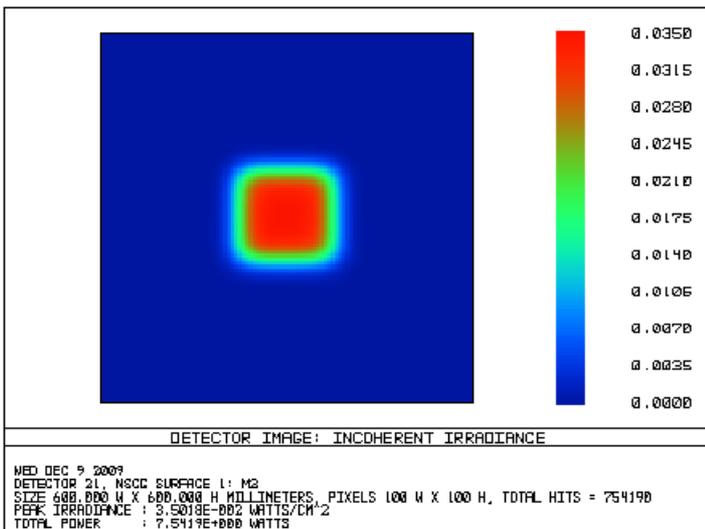
Soluzione singolo modulo centrale, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 30°



Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità
 Simulazione della configurazione del modulo centrale a 50°. Efficienza sul rivelatore 94%.

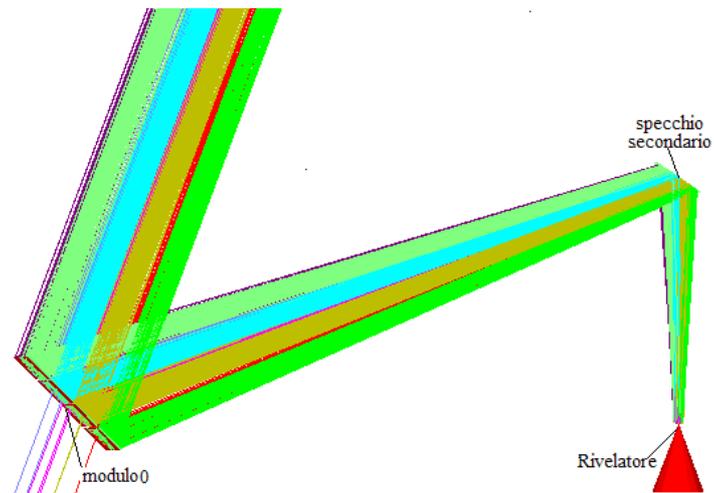


Soluzione singolo modulo centrale, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 50°

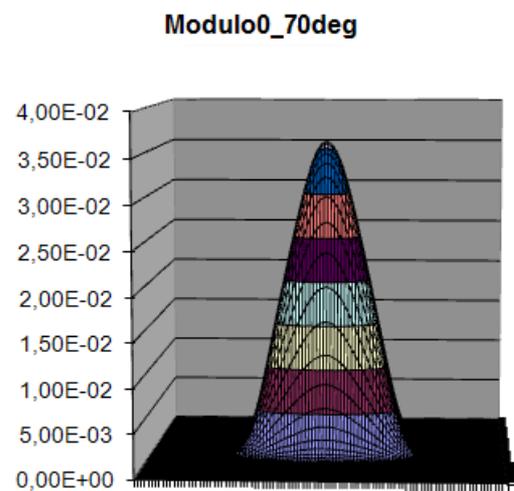
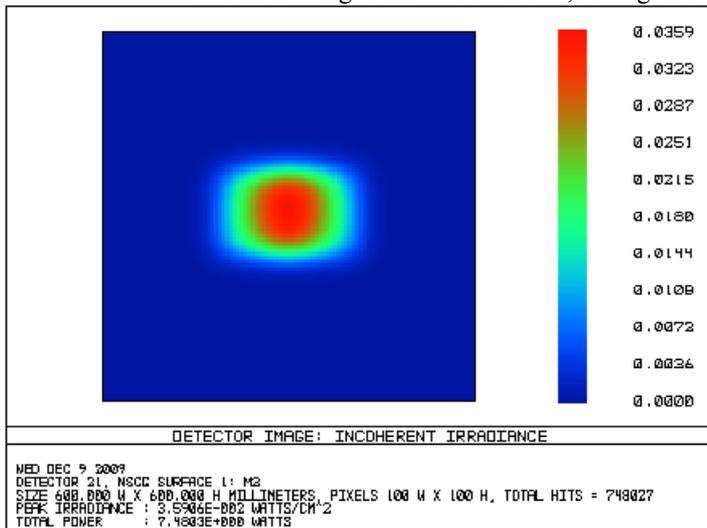


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo centrale a 70°. Efficienza sul rivelatore 93%.

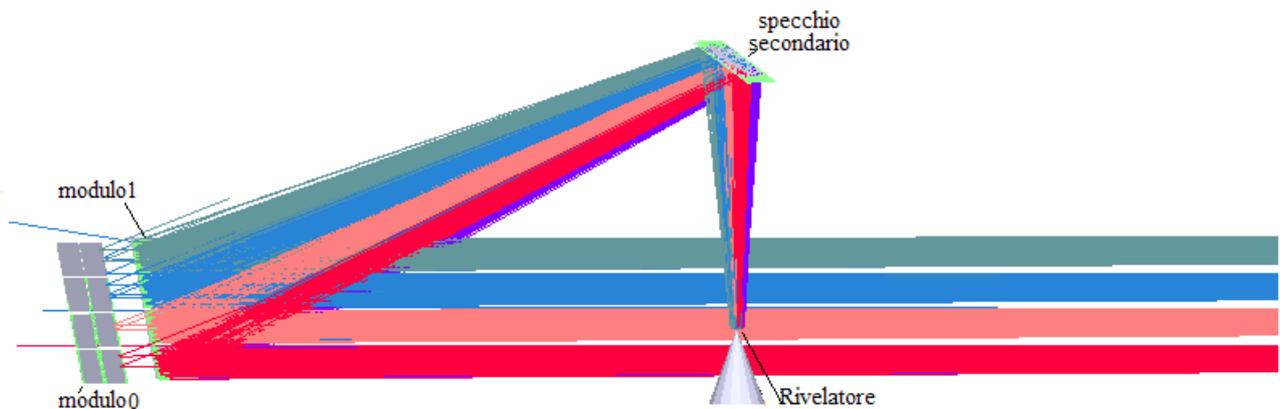


Soluzione singolo modulo centrale, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 70°

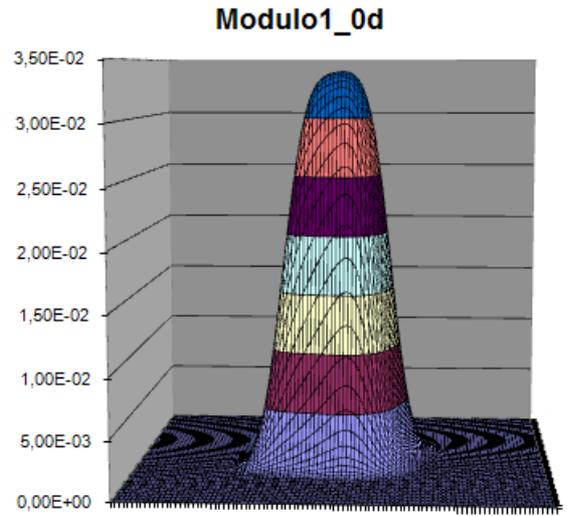
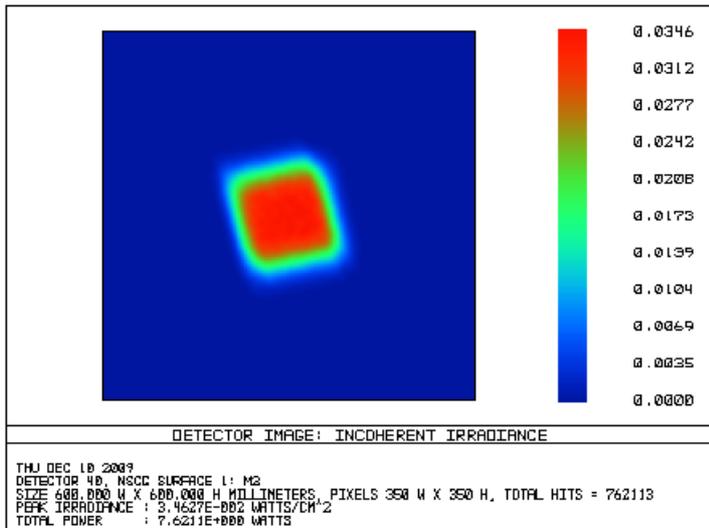


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_1 a 0°. Efficienza sul rivelatore 95%.

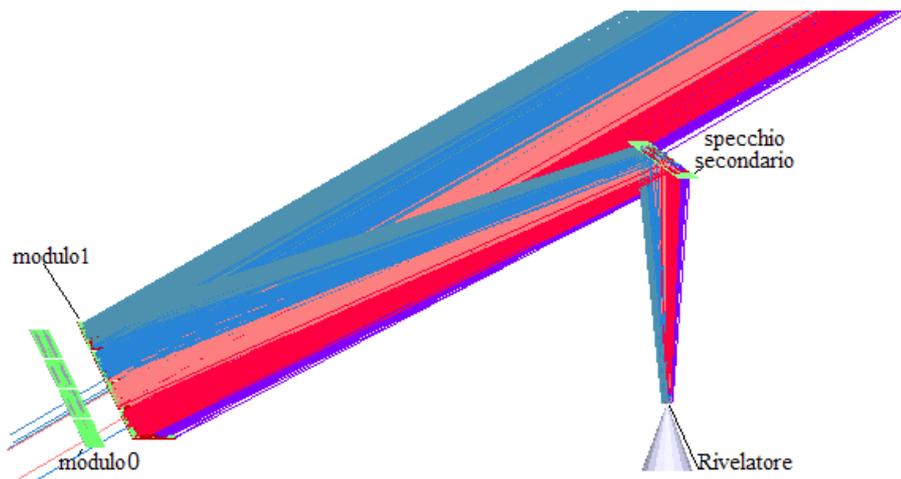


Soluzione singolo modulo_1, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 0°

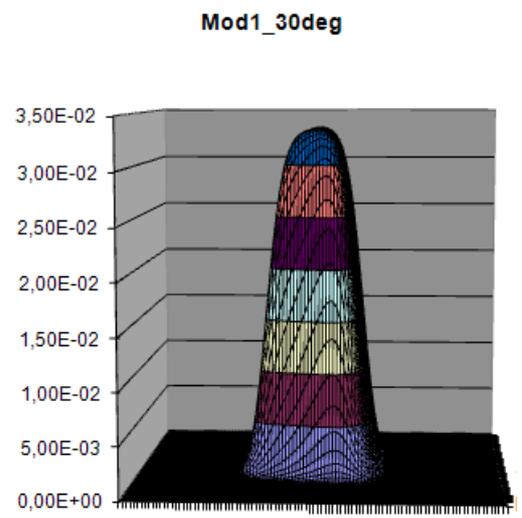
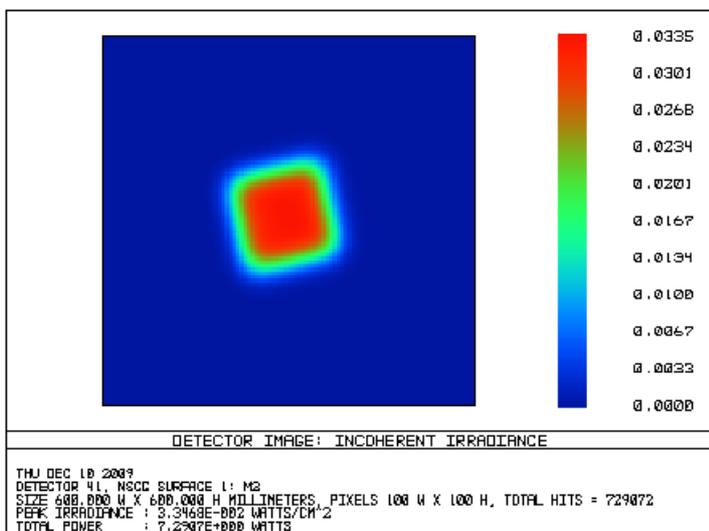


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_1 a 30°. Efficienza sul rivelatore 91%.

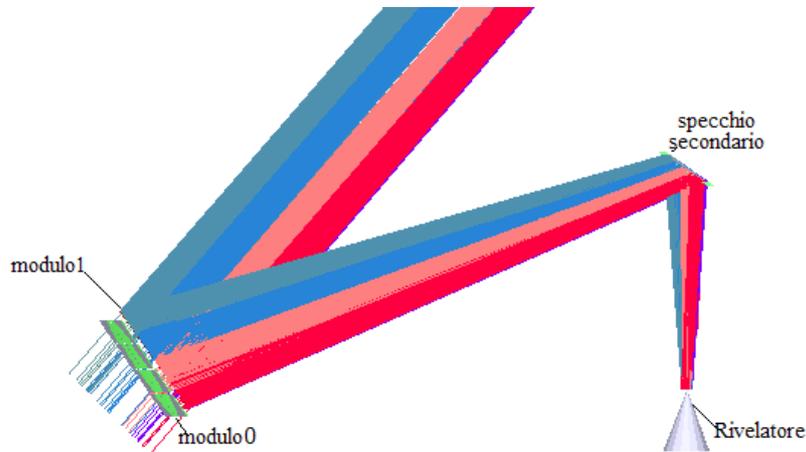


Soluzione singolo modulo_1, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 30°

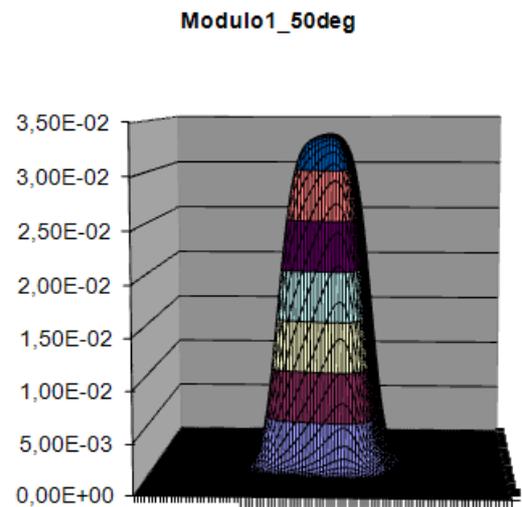
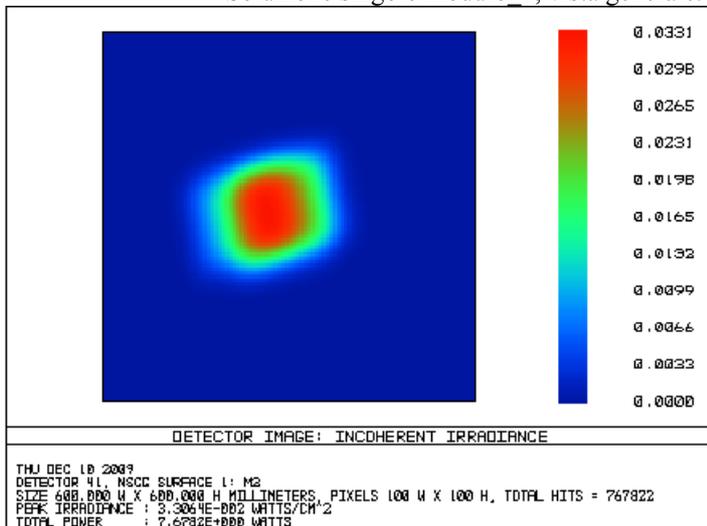


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_1 a 50°. Efficienza sul rivelatore 96%.

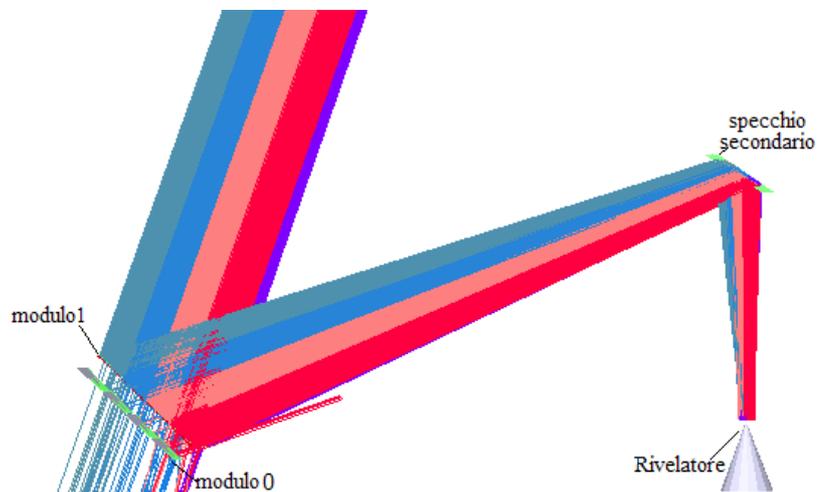


Soluzione singolo modulo_1, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 50°



Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_1 a 70°. Efficienza sul rivelatore 97%.



Soluzione singolo modulo_1, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 70°

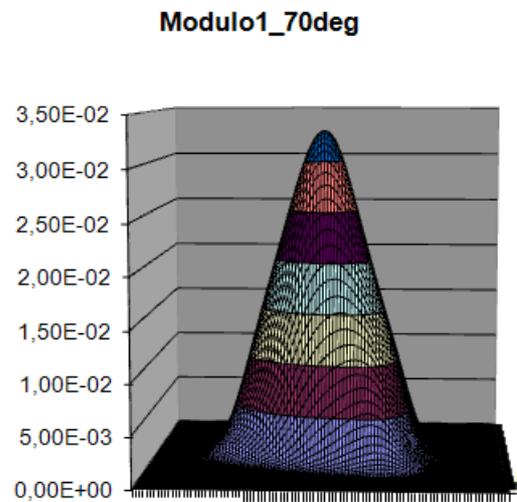
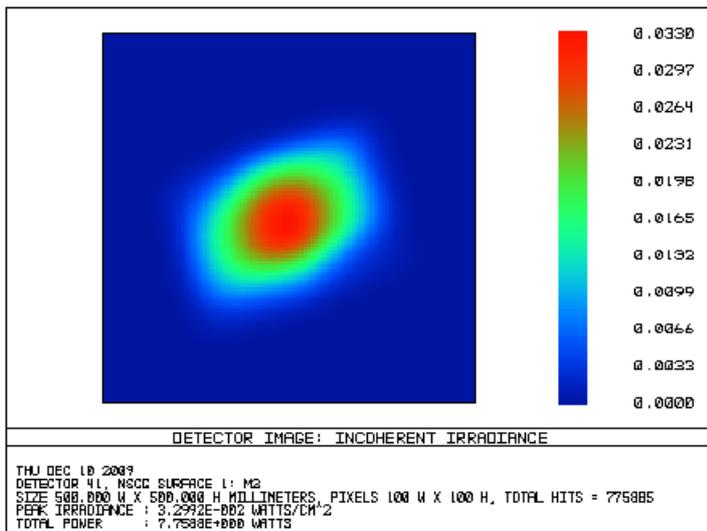
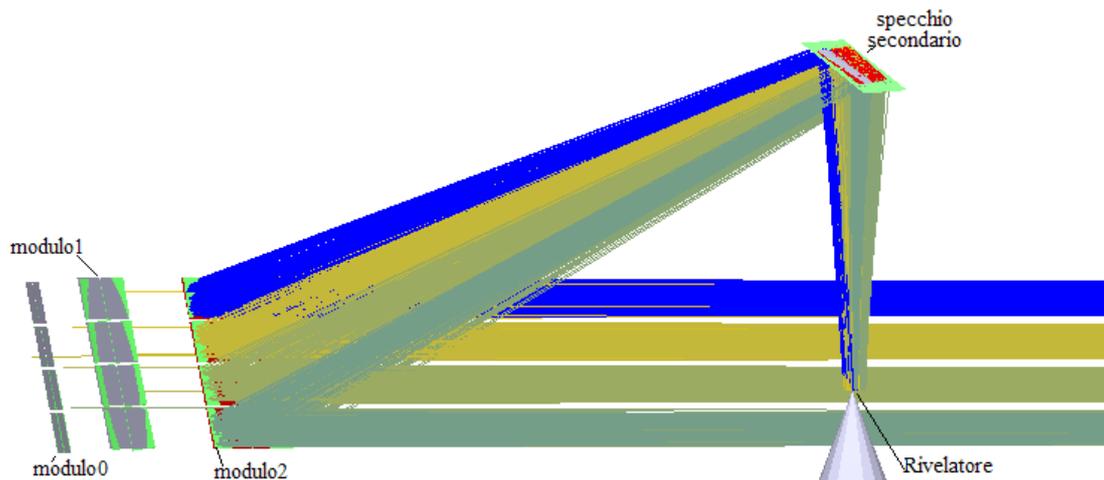
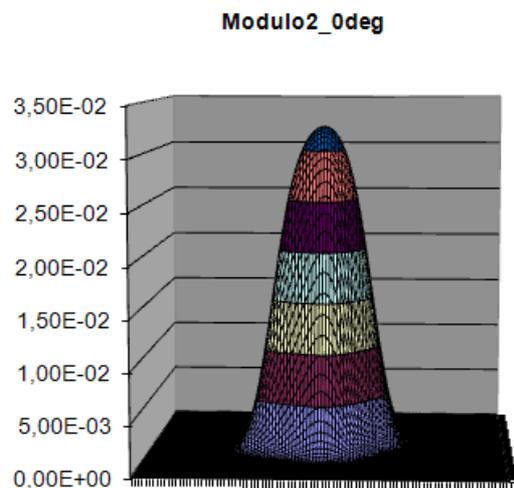
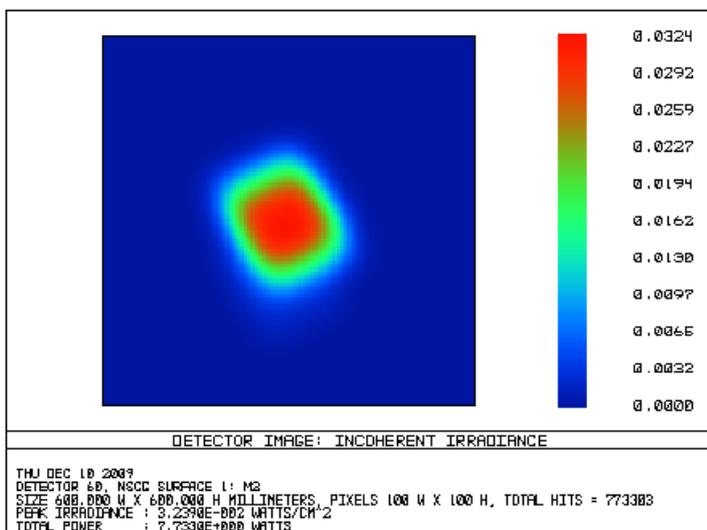


Figura --: Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_2 a 0°. Efficienza sul rivelatore 97%.

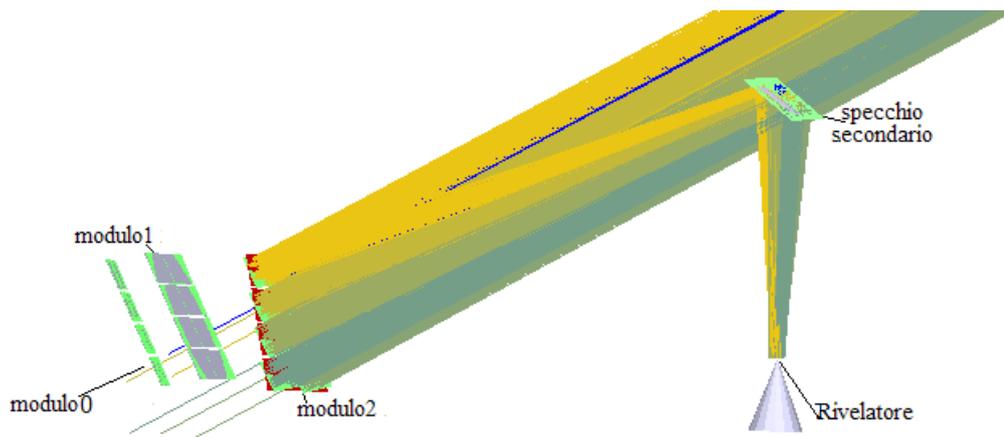


Soluzione singolo modulo_2, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 0°

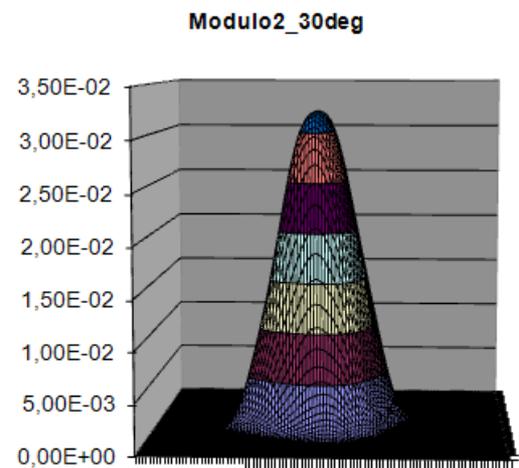
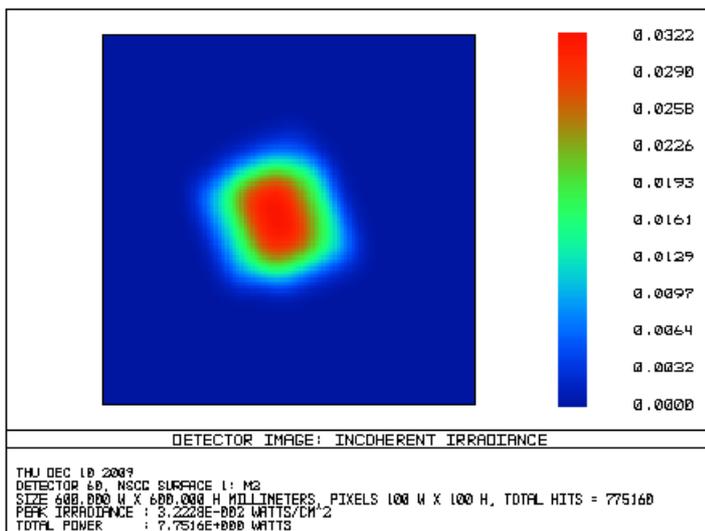


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_2 a 30°. Efficienza sul rivelatore 97%.

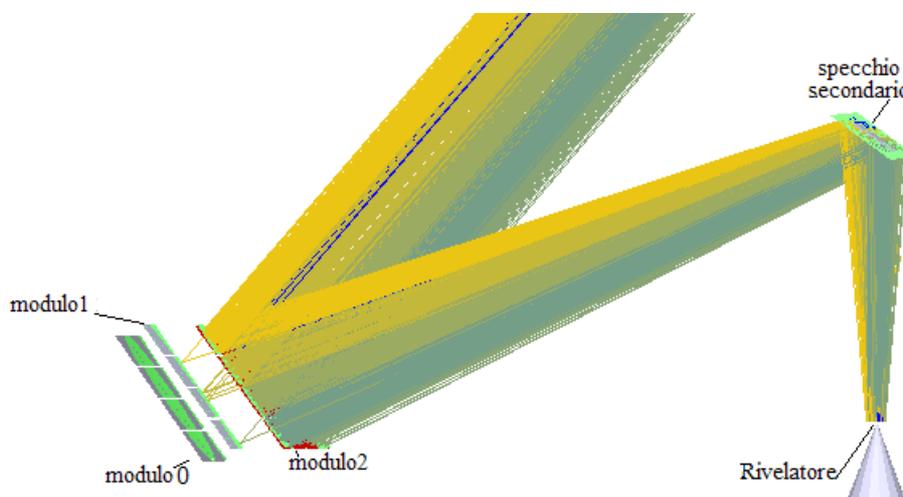


Soluzione singolo modulo_2, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 30°

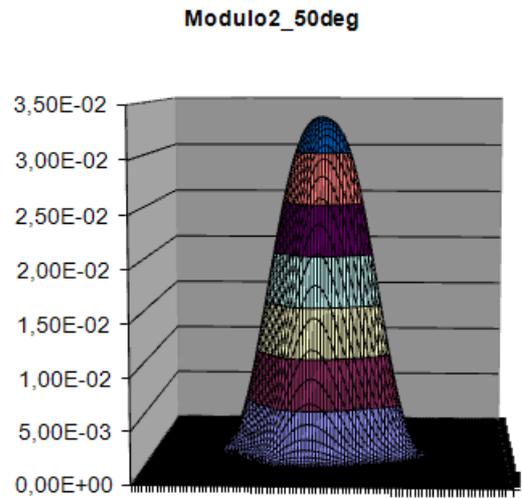
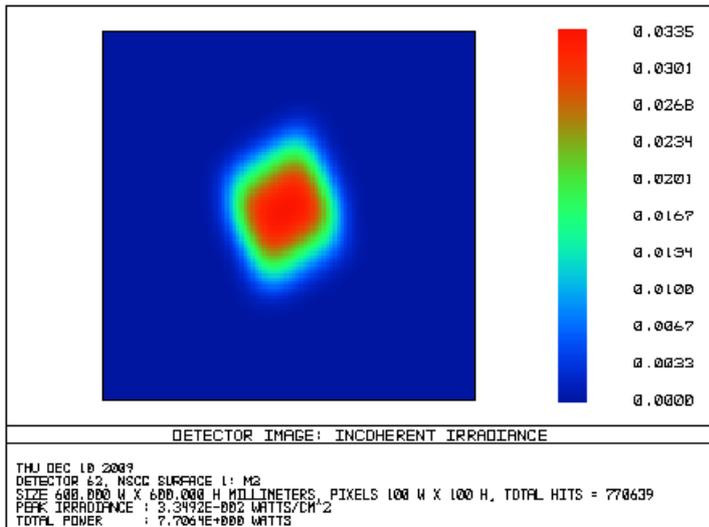


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_2 a 50°. Efficienza sul rivelatore 96%.

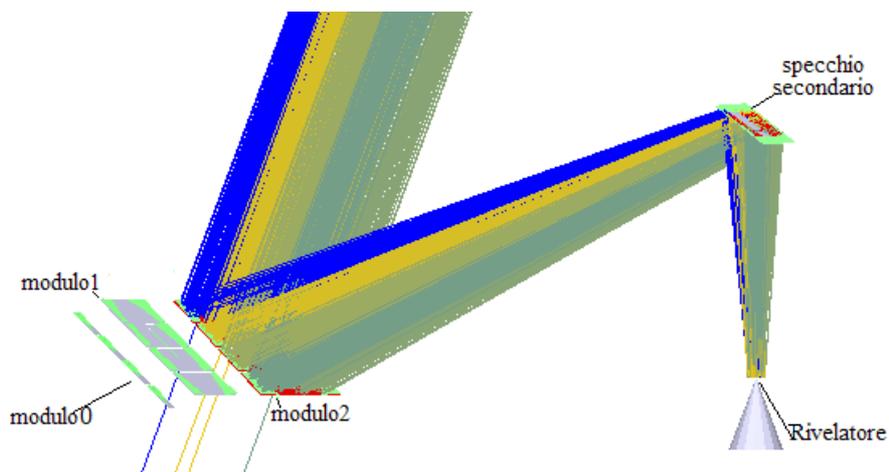


Soluzione singolo modulo_2, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 50°

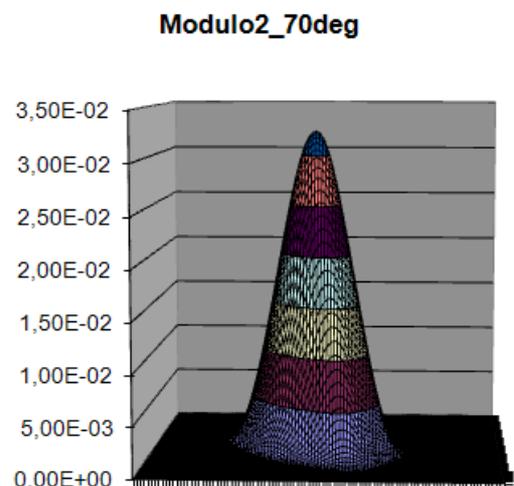
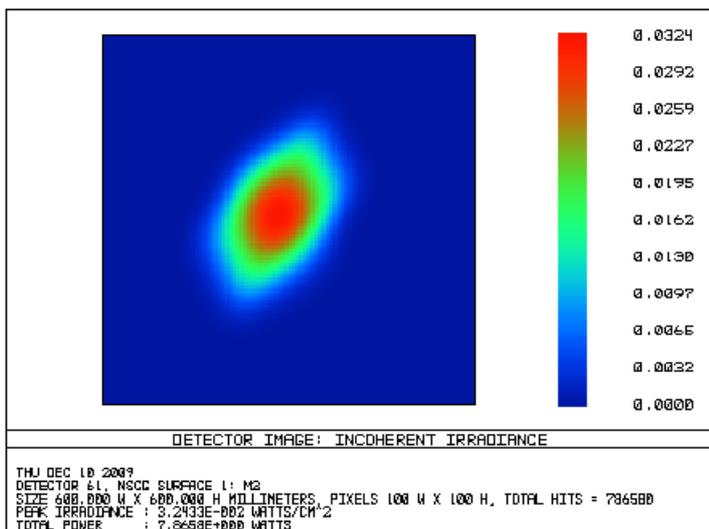


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_2 a 70°. Efficienza sul rivelatore 98%.

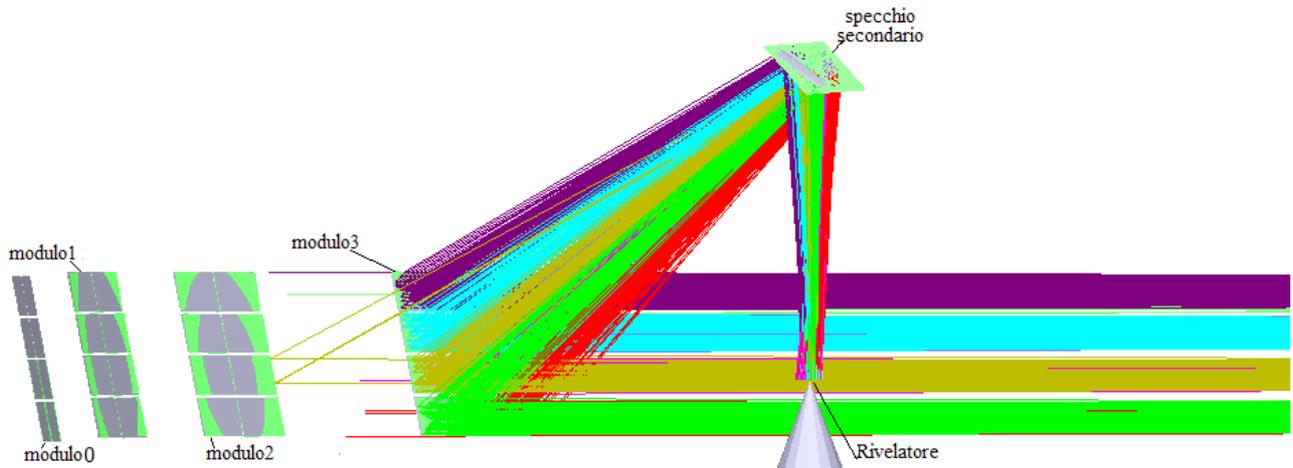


Soluzione singolo modulo_2, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 70°

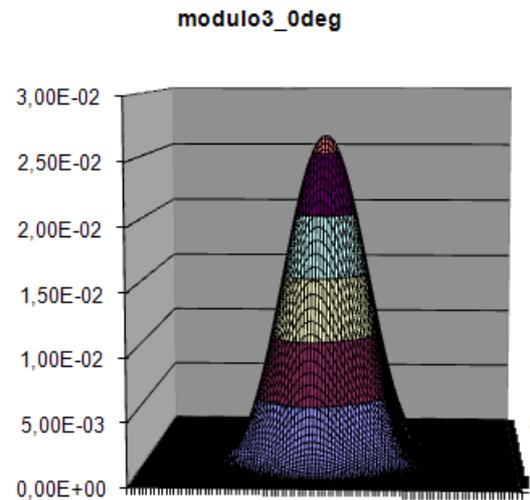
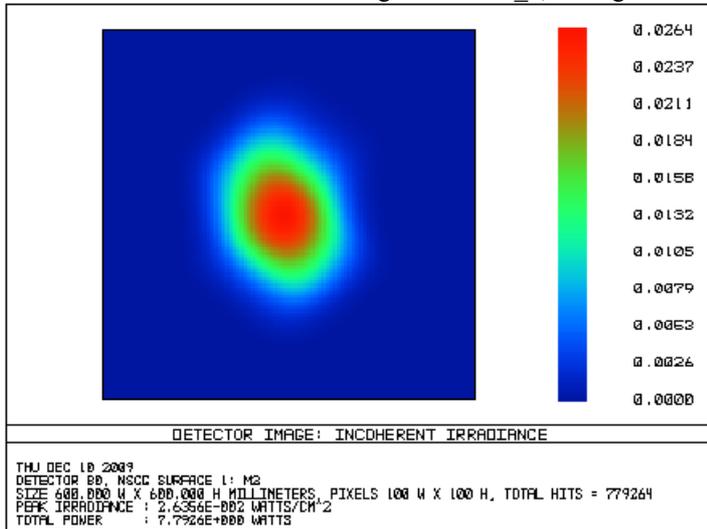


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_3 a 0°. Efficienza sul rivelatore 97%.

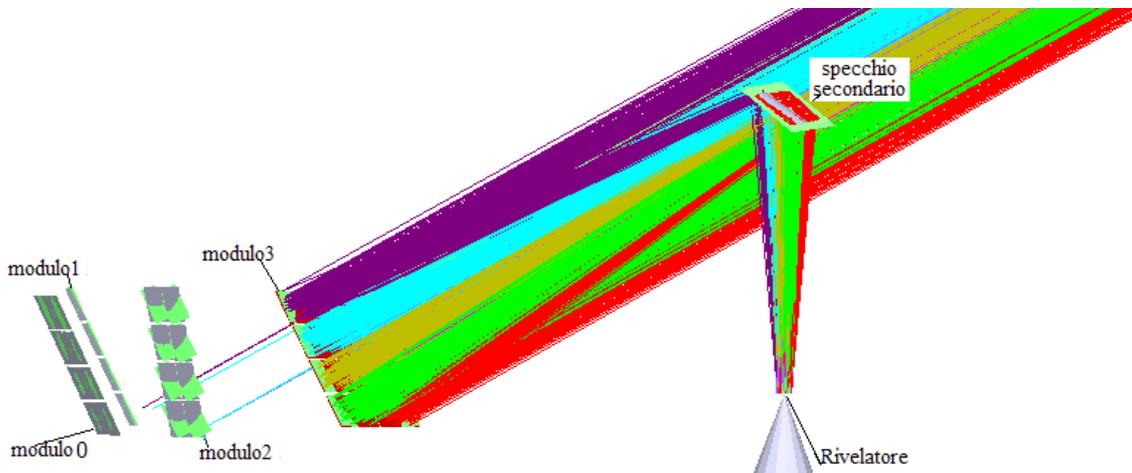


Soluzione singolo modulo_3, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 0°

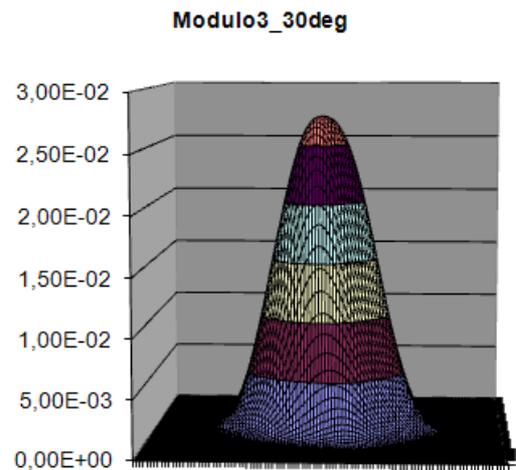
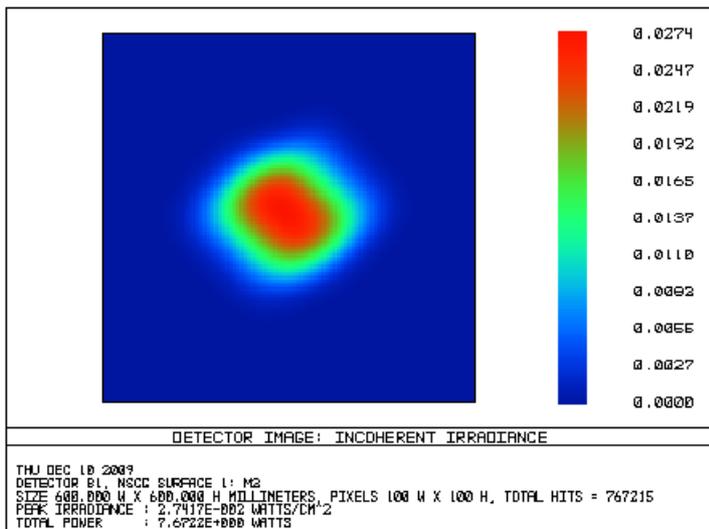


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_3 a 30°. Efficienza sul rivelatore 96%.

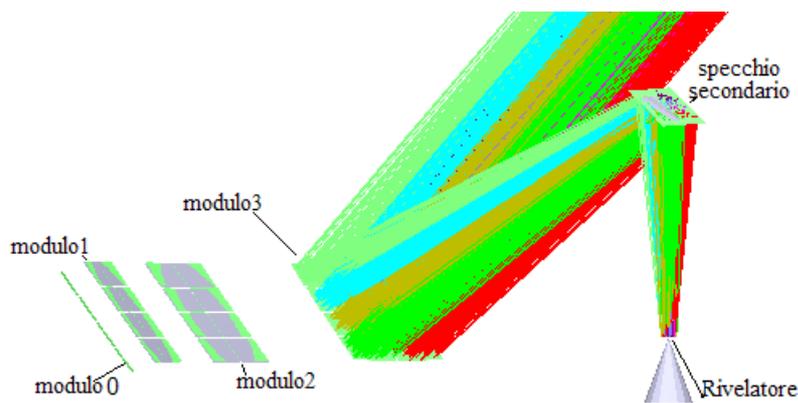


Soluzione singolo modulo_3, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 30°

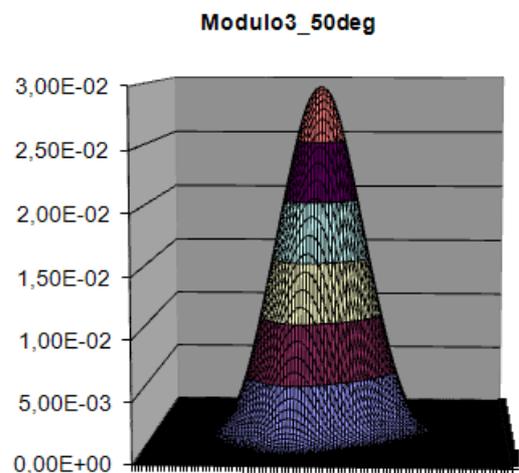
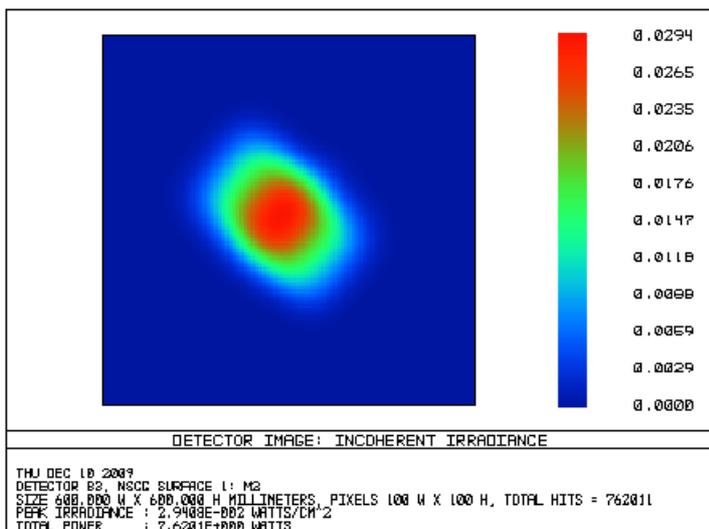


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_3 a 50°. Efficienza sul rivelatore 95%.

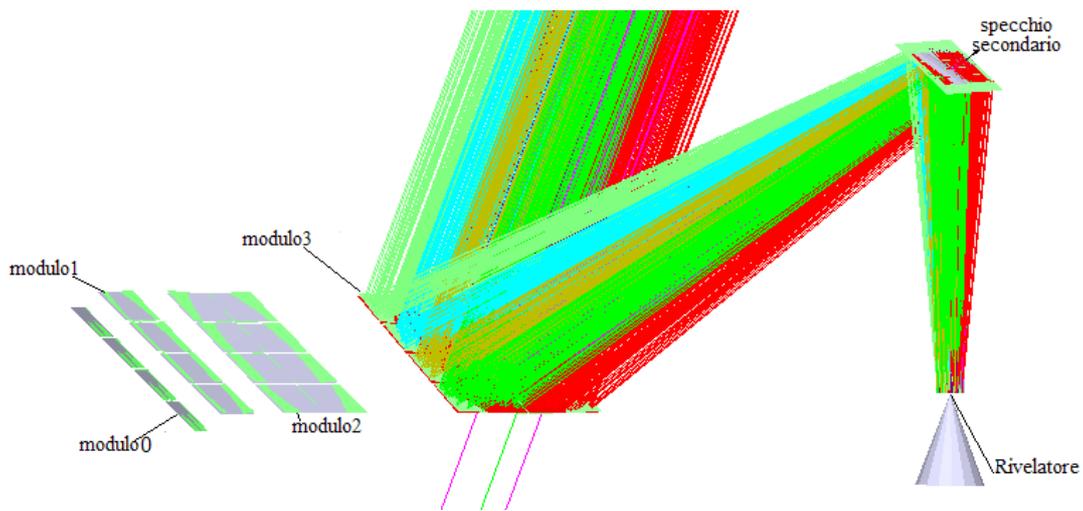


Soluzione singolo modulo_3, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 50°

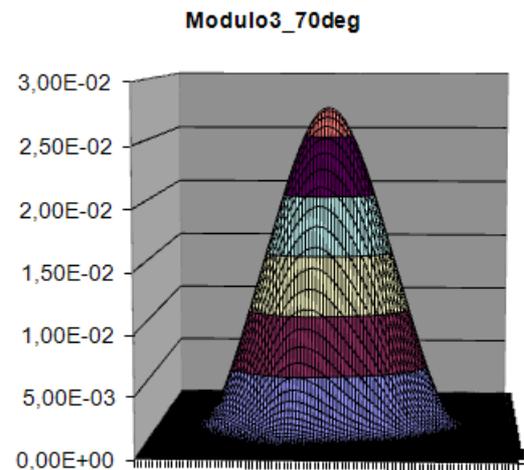
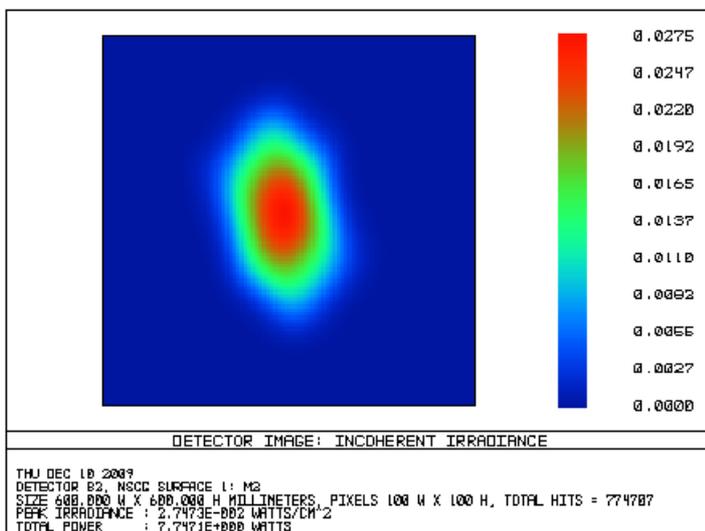


Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Simulazione della configurazione del modulo_3 a 70°. Efficienza sul rivelatore 97%.



Soluzione singolo modulo_3, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 70°



Spot sul rivelatore e relativo profilo d'intensità

Misure

Sono stati effettuati due tipi di misure, uno semi-quantitativo, per verificare la forma del fascio concentrato, uno quantitativo, per misurarne la potenza.

La prima misura, in origine, doveva essere effettuata fotografando uno schermo diffusore schermato da un filtro astrosolar. Questo filtro era stato testato, per verificare la tenuta sotto l'irraggiamento solare concentrato. Tuttavia, in fase di misura, non ha retto alla potenza incidente, e la tecnica è stata abbandonata. In sostituzione, è stato fotografato un foglio di alluminio, verniciato con vernice grigia resistente alle alte temperature, raffreddato da un ventilatore. Rispetto alla versione iniziale, ci sono problemi di parallasse (in origine la macchina fotografica era posta sotto il foglio diffusore, in posizione centrale, mentre dopo è stata posta sopra, in posizione decentrata), e di misurazione quantitativa. Mentre con il filtro il sensore della macchina fotografica rimaneva in condizioni di linearità di risposta, consentendo una stima relativa delle intensità, con il foglio di alluminio il sensore era

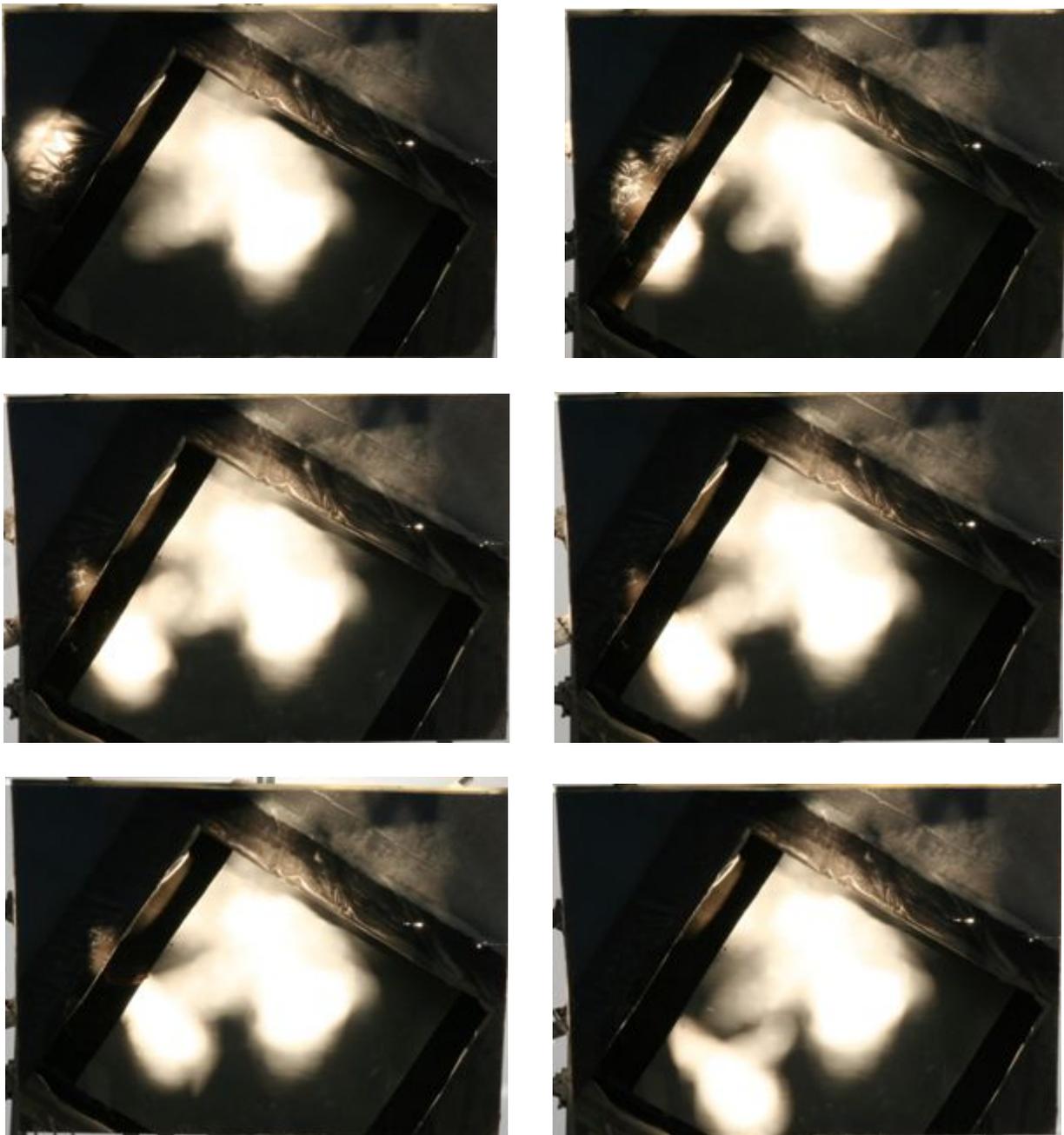
spesso in saturazione. In ogni caso, è possibile dare una forma ed una dimensione al fascio concentrato, e verificare la corretta posizione del fuoco.

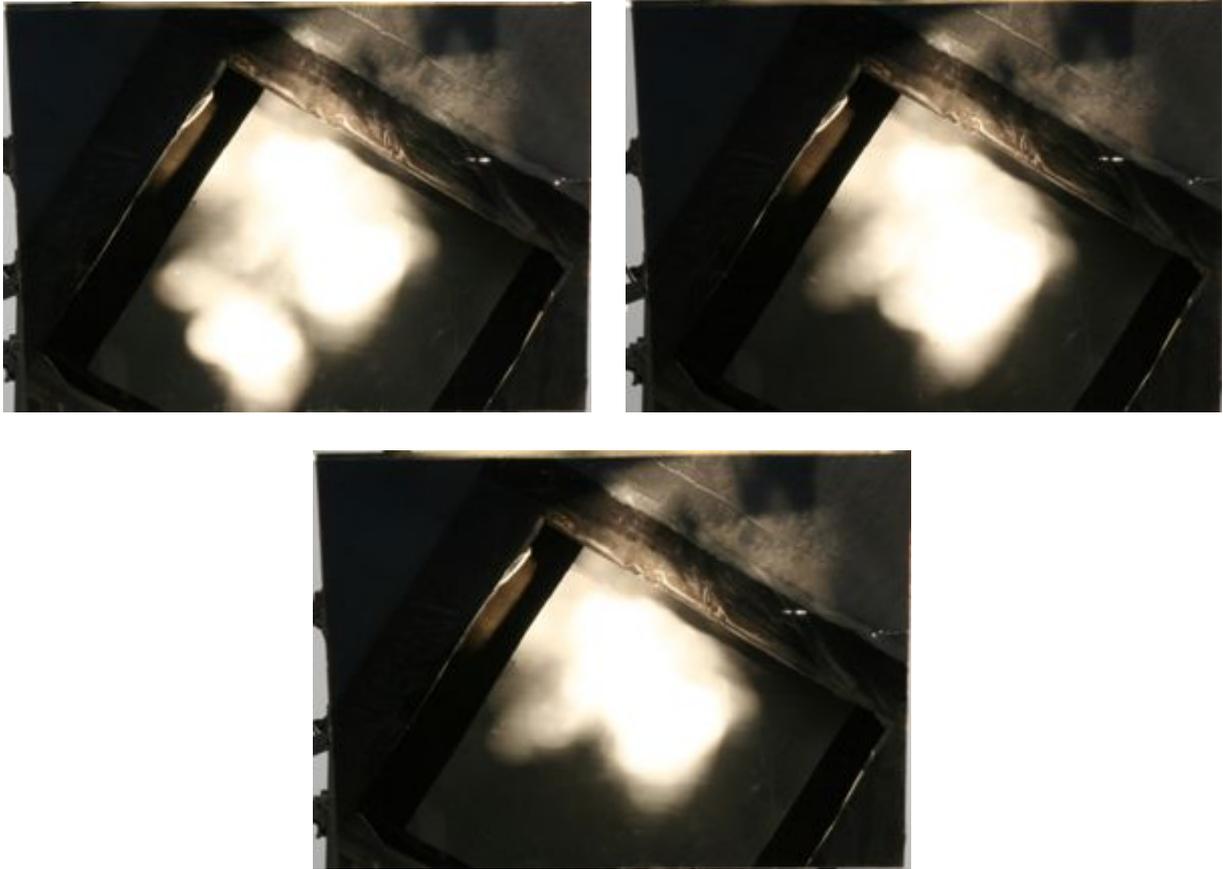
La serie di foto che segue mostra una scansione verticale della forma del fascio.



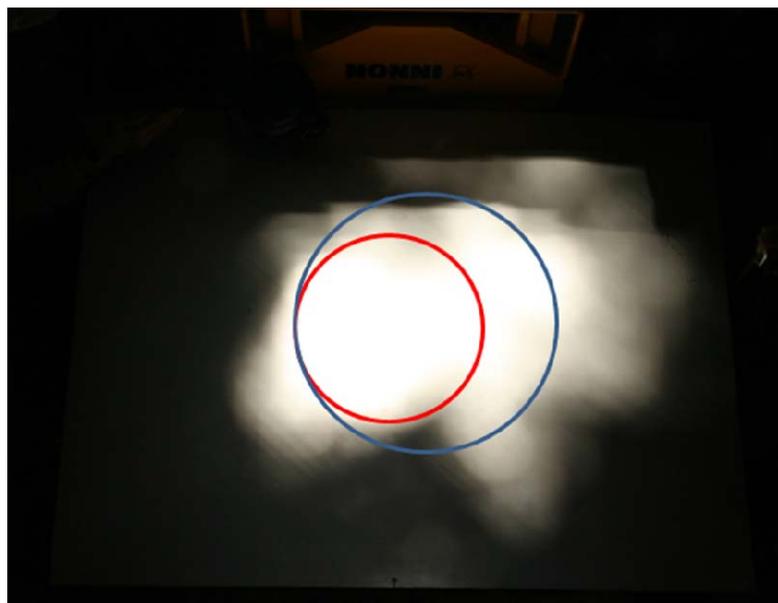
L'ultima foto della serie precedente mostra una zona evidentemente più chiara. In quella zona è stata effettuata la misura quantitativa della radiazione concentrata, grazie al corpo nero realizzato dal partner ENERGETICA. Questa misura è stata confrontata con il dato della radiazione diretta, misurata dal sensore della stazione meteo impiantata da IBIMET. La stazione misura la radiazione complessiva (diretta e diffusa) ricevuta dal sensore. A noi interessa la parte diretta, che è stata calcolata con un modello standard. Il risultato dell'efficienza è stato il 35%, che è il rapporto tra la potenza raccolta in un cerchio di diametro 40 cm nella zona più brillante, e la potenza della radiazione diretta incidente sugli specchi primari.

È stato effettuato un riallineamento degli specchi. L'andamento di questa operazione è documentato nella serie di figure seguente. Nella prima foto si vede un disco luminoso sulla sinistra che viene gradualmente sovrapposto all'immagine preesistente.





Queste foto sono state scattate posizionandosi nei pressi del carrello, ed inquadrando lo schermo attraverso lo specchio secondario. Una nuova verifica della forma e dell'intensità raccolta forniscono i risultati della figura seguente, nella quale il cerchio rosso rappresenta il corpo nero.

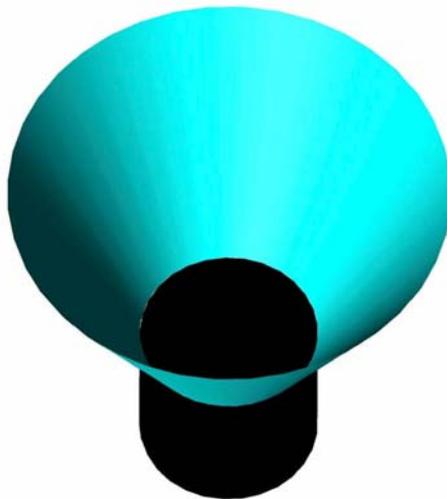


In questo caso, l'immagine mostra la saturazione del rivelatore, mentre la visione ad occhio nudo permetteva ancora di identificare una zona di massima luminosità. L'efficienza è salita al 40%.

Commenti

Nella figura precedente è tracciato un cerchio blu. Questo cerchio rappresenta l'area in cui è raccolta la stragrande maggioranza della radiazione concentrata, ed ha una superficie doppia, rispetto al corpo nero. Partendo dalla superficie degli specchi, vuol dire un fattore di concentrazione di 30. Supponendo però di inviare sulla stessa superficie la luce raccolta dagli specchi di un concentratore reale, ciò vuol dire un rapporto di concentrazione totale di circa 2000, che è due volte il nostro obiettivo minimo iniziale.

Occorre, a questo punto, ricordare che, nell'arco delle discussioni preliminari alla scelta ed alla realizzazione del concentratore, era stato discusso l'impiego di un cono concentratore. Si tratta di una superficie tronco-conica, riflettente, posta davanti all'ingresso dell'utilizzatore, in grado di inviare nell'utilizzatore stesso una frazione della luce diretta nelle immediate adiacenze del foro di ingresso. Questo cono deve essere metallico, in quanto la densità di potenza sconsiglia l'uso di altri materiali. Con questo accorgimento, si può recuperare una parte dell'energia altrimenti persa. Inoltre, questo oggetto può schermare le immediate vicinanze del corpo nero da radiazione solare concentrata, potenzialmente dannosa.



In realtà, abbiamo sempre giudicato questa soluzione un ripiego, non un componente standard, perché riteniamo che ci siano margini di miglioramento delle prestazioni del concentratore, senza ricorrere ad altri artifici.

Una volta raggiunti questi risultati, si tratta di stabilire delle dimensioni ragionevoli per il corpo nero, garantendo che la luce ci entri in qualsiasi condizione di orientamento.

Il compromesso sulle dimensioni può includere il cono concentratore, in condizioni estreme. Ad esempio, nel periodo a cavallo del solstizio di estate (ci riferiamo all'emisfero nord), il sole è alla massima altezza, ovvero nelle condizioni più critiche per il mantenimento della focale. Si può scegliere di rilassare i vincoli sulla focalizzazione, sapendo che nelle ore intorno al mezzogiorno di alcuni giorni intorno al solstizio, parte della radiazione raggiungerà il corpo nero rimbalzando sul cono.

La discrepanza tra le immagini piccole e regolari delle simulazioni, e quelle sperimentali, è dovuta ad alcuni fattori:

- Irregolarità nella superficie degli specchi
- Irregolarità nell'allineamento

L'efficienza, inoltre, è condizionata dalla riflettività delle superfici. Questo punto verrà discusso più ampiamente nella sezione successiva.

Prospettive

Il dimostratore ha provato sperimentalmente, già adesso, di avere prestazioni migliori dei sistemi di concentrazione attuali. Tuttavia, riteniamo sia il caso di agire su alcune caratteristiche, in modo da rendere i risultati più affidabili e ripetibili.

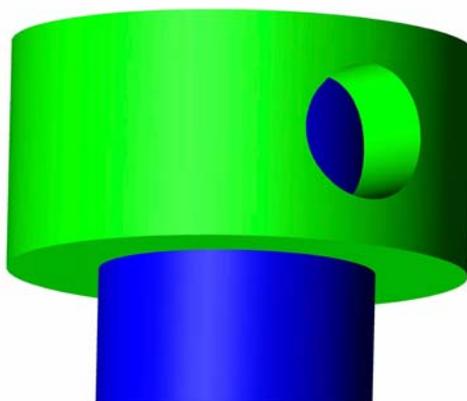
In primo luogo, occorre intervenire sulle procedure di lavorazione degli specchi. Gli specchi utilizzati sono stati realizzati in due pezzi, di 60x80 cm², giuntati tra loro con colla e viti, lungo uno dei lati corti. Questa procedura può comportare problemi nell'allineamento relativo delle due metà di ciascuno specchio, e disomogeneità delle tensioni dei componenti. Inoltre, otto specchi su dieci sono stati realizzati non solo tramite stampaggio del supporto ed incollaggio dello specchio, ma con un passaggio intermedio, ovvero la rifresatura della superficie del supporto. Questa procedura non è, evidentemente, suscettibile di applicazione industriale, dati i tempi ed i costi, ma è stata utilizzata, a scopo sperimentale, per migliorare le caratteristiche superficiali degli specchi. Occorre quindi che il supporto dello specchio venga stampato direttamente nel formato corretto, e con le caratteristiche ottiche finali. Giova, a questo scopo, cambiare anche la costolatura di rinforzo del supporto, che provoca delle tensioni superficiali, visibili nelle immagini riflesse.

Una volta che le immagini dei singoli specchi sono più nitide, è possibile migliorare l'allineamento. Sotto questo aspetto, abbiamo riscontrato un problema legato al modo di sostenere gli specchi. Come detto in precedenza, gli specchi sono sostenuti da un perno cardanico, ed orientati da due attuatori. Il perno cardanico dovrebbe assicurare la rotazione intorno a due assi. Al contrario, abbiamo verificato un gioco nel giunto, che consente agli specchi di ruotare leggermente intorno ad un asse parallelo alla normale. Questo movimento va eliminato, in quanto comporta seri problemi di orientamento. Va anche detto che questo metodo di supporto ed orientazione non è adatto per l'uso industriale, dato il costo in termini di componenti, consumi elettrici e procedure di attuazione. Un sistema finale dovrebbe avere solo l'orientazione intorno ad un asse orizzontale, parallelo alla superficie dello specchio. Questa rotazione, per motivi fisici, è legata solo all'altezza del sole sull'orizzonte, e quindi all'angolo di alzo dello specchio. È possibile quindi legare i vari movimenti degli specchi al solo movimento di alzo del telaio che li regge, grazie ad un albero a camme, tipo quelli dei motori, unito ad un sistema di leve e registri. L'eliminazione del gioco del cardano riguarda solo il miglioramento delle prestazioni del dimostratore, più che la realizzazione pratica di un impianto industriale.

La riflettività degli specchi può essere migliorata in due modi: aumentando la riflettività delle superfici necessarie, ed eliminando le superfici opzionali. Per aumentare la riflettività delle superfici è possibile utilizzare specchi con coating posto anteriormente al substrato, invece che posteriormente. Gli specchi attuali hanno un substrato di vetro, che viene attraversato due volte dalla luce, con il rivestimento riflettente posto dietro il vetro. Risulta più facile pulire gli specchi, ma ci sono delle perdite legate all'assorbimento del vetro nell'infrarosso. Posizionando lo strato riflettente davanti al supporto, non è più necessario che quest'ultimo sia trasparente, e quindi non viene più richiesto il vetro. Addirittura, potrebbe essere sufficiente il pannello in plastica, purché di caratteristiche ottiche idonee.

La superficie riflettente eliminabile è quella dello specchio secondario. Infatti, posizionando il dito caldo dell'utilizzatore nella torre, otteniamo sempre un utilizzatore fisso, cosa che

abbiamo sempre considerato un requisito irrinunciabile, ma con una riflessione in meno. Nella figura che segue, il cilindro verde è girevole (il colore è artificiale, in realtà l'interno deve essere nero), mentre il cilindro blu è fisso. Ruotando il cilindro verde insieme con il carrello, la radiazione viene intrappolata come in un corpo nero, ed assorbita dall'utilizzatore, senza bisogno di rinvii.



Tutti gli accorgimenti descritti in precedenza hanno come scopo sia il miglioramento delle caratteristiche tecniche del concentratore, sia la diminuzione dei costi di realizzazione e di esercizio. Bisogna ricordare che questi due aspetti sono profondamente legati tra loro, in quanto è sicuramente possibile avere una focalizzazione perfetta, ma a costi proibitivi, così come è possibile ridurre molto i costi, ma a scapito dell'efficienza. L'obiettivo del Progetto STAR è sempre stato quello di trasformare una Ferrari, ovvero il telescopio astronomico, in una vettura da città, diminuendo le prestazioni, ma a prezzi accessibili a chiunque.

Un concentratore innovativo ha la possibilità di entrare nel mercato solo se la qualità è maggiore, ad un prezzo non maggiore dei precedenti.

Alcune caratteristiche del dimostratore possono essere innovate direttamente sul dimostratore, per esempio gli specchi ed i giochi dei supporti. Altre richiedono la messa in opera di un sistema molto vicino all'applicazione industriale. Le necessità di investimento sono notevolmente diverse nei due casi. Per il primo, sono sufficienti un anno di lavoro, ed un impegno economico sicuramente minore di quello del Progetto STAR. Per il secondo l'impegno temporale è di diciotto mesi, mentre il calcolo dei costi di investimento va demandato a chi ne ha la competenza, che nel caso della nostra partnership è Ronda High Tech S.r.l.

Ringraziamenti

Ringraziamo Leonardo Cirri, Tonina De Toffol, Paola Fraioli, Alessandro Frandi, Daniela Fubiani, Roberta Parenti, Pasqualina Pipino, Simonetta Renai, per il lavoro di amministrazione, e Massimo D'Uva per la realizzazione di numerosi componenti meccanici del dimostratore.