

STAR – Solare Termodinamico ad Alto Rendimento

CNR - INOA

WP1: Studio di fattibilità di concentratori solari ad alta efficienza

Task 1.1: Progettazione dei concentratori

Rapporto finale sulle caratteristiche degli specchi del concentratore

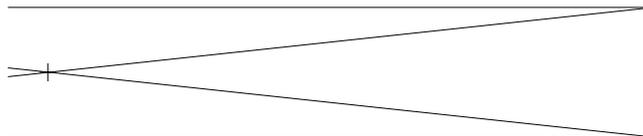
Sommario

Descrizione dei problemi ottici del concentratore	1
Simulazioni.....	5
Il concentratore a specchi piani.....	5
Simulazioni di specchi curvi non adattivi	9
Simulazione dell'adattività degli specchi	12

Descrizione dei problemi ottici del concentratore

Ogni concentratore solare deve fare i conti con le caratteristiche della sorgente di luce, ovvero il Sole.

La prima caratteristica, poco apparente, è la divergenza. La lunghezza del diametro solare di 1.400.000 km fa sì che, a dispetto della distanza del Sole dalla Terra, la luce in arrivo non si possa schematizzare come un'onda piana, ma come una onda con circa 0.5° di divergenza. Questo vuol dire che l'immagine di uno specchio piano, per esempio rotondo, perpendicolare alla direzione di provenienza della luce, non è costante, grande quanto lo specchio stesso, ma il suo diametro aumenta linearmente di circa 9 cm per ogni 10 metri di allontanamento dallo specchio. Allo stesso modo, la dimensione del fuoco di uno specchio concavo è pari a circa 9 mm per la distanza focale espressa in metri (Fig. 1).



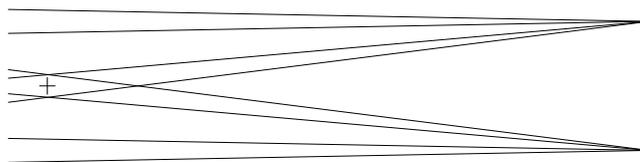


Figura 1: Differenza tra la focalizzazione di una sorgente collimata e quella di una sorgente divergente. La crocetta sulla sinistra indica la posizione del fuoco.

La seconda caratteristica, evidente a tutti, è che il sole cambia la sua posizione nel cielo. Ogni giorno l'escursione di altezza sull'orizzonte spazia da zero ad un massimo, al mezzogiorno solare, che alla latitudine di Firenze ($43^{\circ} 47' N$), passa da 22.7° al solstizio d'inverno, a 69.7° al solstizio d'estate. Inoltre il Sole sorge ad Est, e tramonta a Ovest. Questo vuol dire che, se vogliamo rinviare la luce del Sole su di un punto fisso, dobbiamo ruotare il nostro specchio di un angolo appropriato.

Se lo specchio è piano, il fatto di ruotarlo comporta che la superficie effettiva dello specchio venga ridotta di un fattore pari al coseno dell'angolo tra la direzione di provenienza della luce e la normale allo specchio. Un angolo di 30° comporta una riduzione del 13.4% nella superficie utile.

Se lo specchio è concavo (per esempio una calotta sferica), oltre alla diminuzione della superficie utile, avvengono due altri fenomeni:

1) la variazione della distanza focale effettiva. La Figura 2 mostra come, ad una incidenza di 30° , la zona del fuoco effettivo si sposti rispetto alla distanza focale nominale. Per eliminare questo effetto, la curvatura dello specchio deve cambiare durante la giornata.

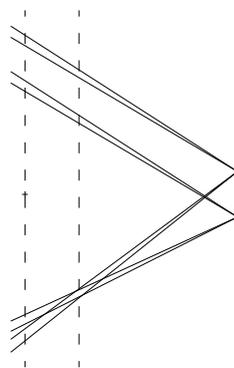


Figura 2: Cambiamento della focale effettiva al variare della direzione di provenienza della luce.

2) l'astigmatismo. In pratica, nella direzione perpendicolare al piano individuato dalle direzioni di provenienza e di riflessione, la luce viene focalizzata sempre meno, all'aumentare dell'angolo di incidenza. Ciò comporta una diminuzione del potere focalizzante dello specchio. La correzione di questo effetto richiede che lo specchio abbia una componente cilindrica. Poiché questo effetto dipende dall'angolo di incidenza, ed il Sole cambia sia la direzione di provenienza, che l'altezza sull'orizzonte, per tenere l'astigmatismo al minimo occorre uno specchio che cambi la sua componente cilindrica durante il giorno.

Avendo chiare in mente queste caratteristiche della sorgente luminosa, sono state esaminate le varie soluzioni per rendere il sistema efficiente, con il minimo numero possibile di gradi di libertà, ovvero di meccanismi di correzione delle caratteristiche ottiche.

La prima decisione definitiva, presa circa la disposizione del concentratore, è quella di avere una torre fissa, con a bordo l'assorbitore, mentre tutti gli specchi si muovono su un binario circolare, in modo che il piano verticale di simmetria del concentratore passi per il Sole e la torre (Fig. 3). Questa soluzione ha due vantaggi ed uno svantaggio. Il primo vantaggio è che l'angolo, nel piano orizzontale, tra la direzione di provenienza e quella di riflessione della luce, è costante durante il giorno. Questo semplifica il problema di correggere l'astigmatismo in una direzione. Il secondo vantaggio è che è possibile disporre gli specchi in modo tale che non si facciano mai ombra. Per ottenere questo risultato, nei campi solari classici, gli specchi devono essere sparsi in un territorio molto vasto. Il risultato è che l'occupazione del suolo costituisce un problema, e comunque, per basse altezze del Sole sull'orizzonte, l'effetto ombra sussiste comunque. Lo svantaggio è che la meccanica di un concentratore a gradinata rotante è più complicata, sia per i movimenti richiesti, sia perché occorre tener conto dell'effetto del vento sulla struttura.

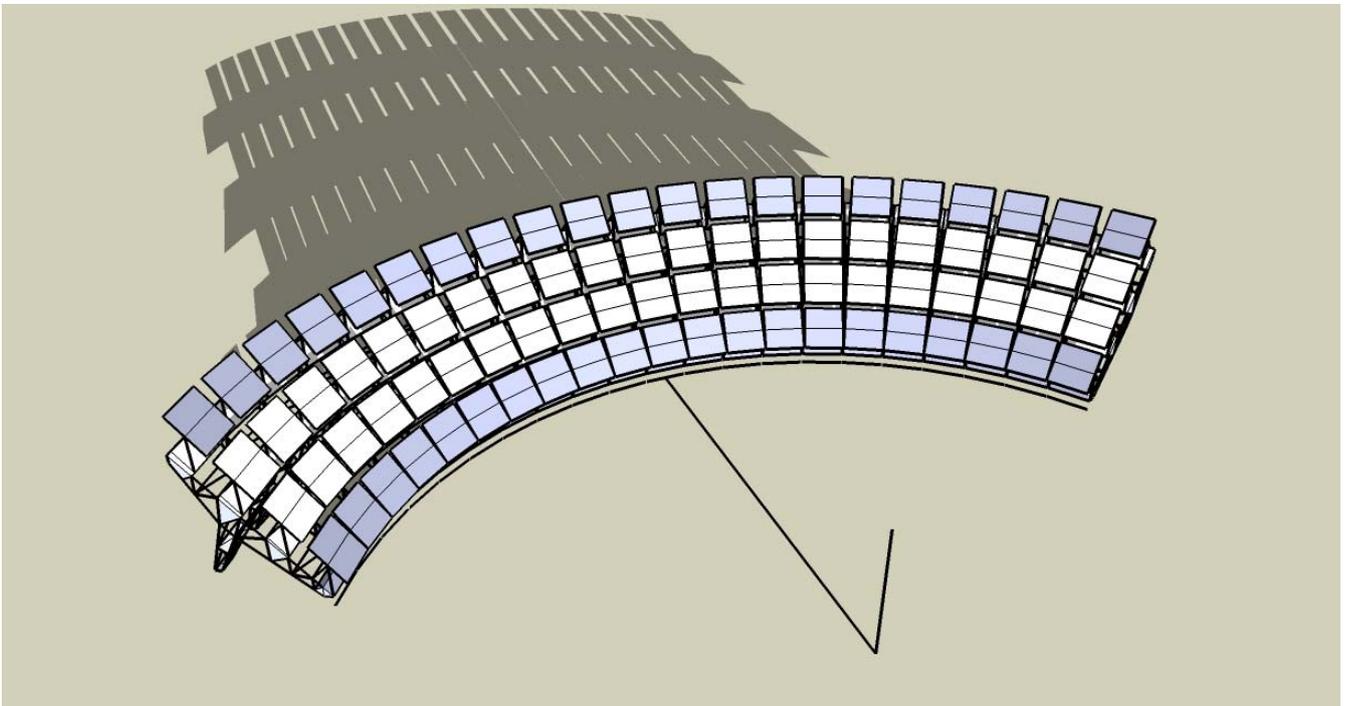


Figura 3: Disposizione proposta per il concentratore.

Allo scopo di avere un fuoco fisso, e semplificare quindi la meccanica e la termodinamica dell'utilizzatore, è necessario interporre tra la gradinata e l'assorbitore uno specchio secondario, che rinvia i raggi, provenienti dallo specchio primario, verso il basso.

Al momento della stesura di questo rapporto, l'orientamento prevalente è che, all'interno della gradinata, gli specchi vengano raggruppati in moduli di $3 \times 3 \text{ m}^2$, ciascuno con due gradi di libertà per il movimento (rotazione intorno a due assi), più uno per l'adattamento della focale. In realtà, anche questa condizione potrebbe cambiare, in virtù di una sperimentazione che sta per essere effettuata su specchi di tipo innovativo.

La soluzione più conservativa, che comunque assicura ad un concentratore come quello descritto un fattore di concentrazione di circa 1000, è quella di realizzare questi moduli

assemblando 100 specchi piani, di dimensioni $30 \times 30 \text{ cm}^2$, in strisce orizzontali di 10 specchi, rotanti intorno ad un asse orizzontale (Fig. 4).

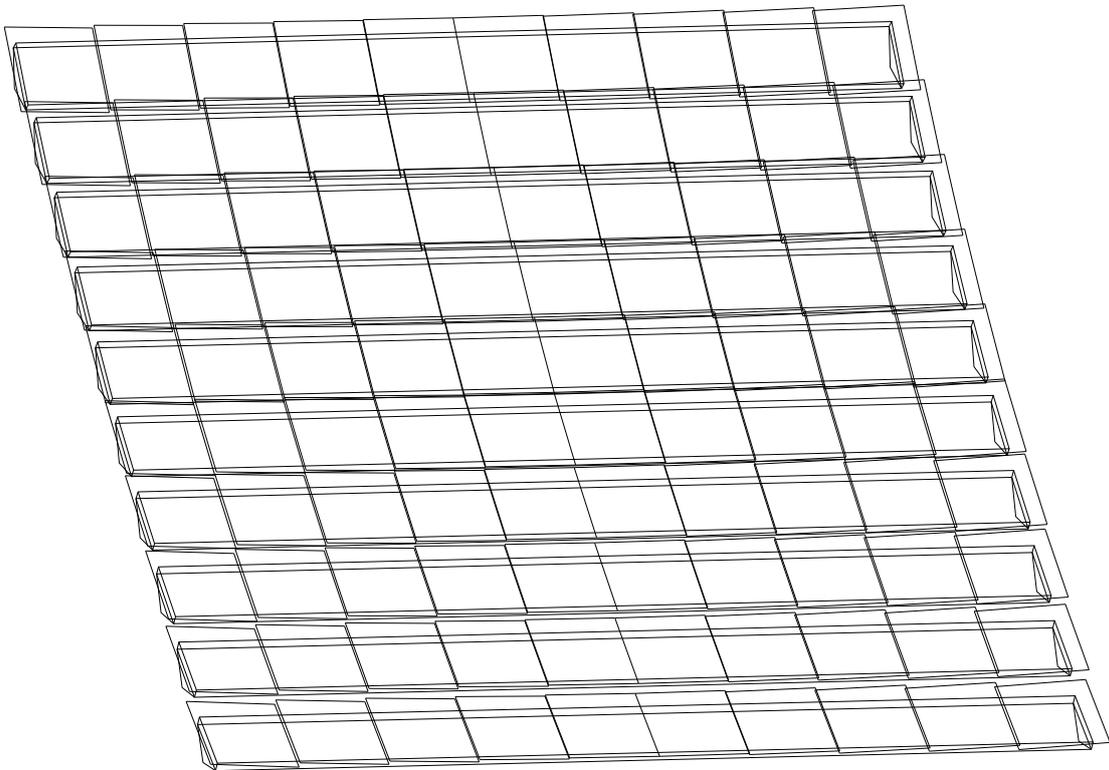


Figura 4: Schema del pannello formato da 10 strisce orizzontali, ognuna composta da 10 specchi di $10 \times 10 \text{ cm}^2$

All'interno della singola striscia gli specchi vengono allineati in modo da essere tangenti ad un cilindro di raggio di curvatura, tale da minimizzare gli effetti dell'astigmatismo (Fig. 5).



Figura 5: Vista in sezione di un possibile orientamento degli specchi, nelle strisce del modulo di Fig. 4

Le strisce possono essere ruotate o montandole su travi verticali, deformabili in maniera controllata, oppure azionandole con cinematismi come quello della Fig. 6.

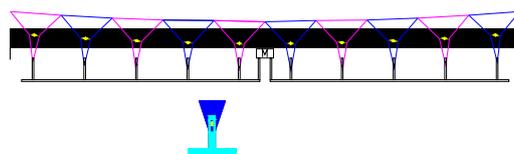


Figura 6: Illustrazione di una possibile tecnica di orientamento delle strisce.

Per inciso, il movimento da imprimere alle strisce dipende esclusivamente dalla inclinazione del modulo. L'INAF ha proposto un metodo di orientamento che si basa sulla deformazione del supporto su cui sono montate le strisce, ed ha come comando un peso applicato in fondo ad un'asta, entrambi dimensionati opportunamente, per ottenere il giusto equilibrio. La stessa idea può essere applicata in questo caso, con la differenza che l'asta con il peso vengono a trovarsi sempre in posizione verticale. Occorre spiegare questa affermazione. In generale, l'asse di rotazione delle strisce passa fuori del centro di massa. Quindi tutte le strisce tendono ad abbassarsi, dal lato degli specchi. Però, vincolando una striscia a quella corrispondente, dall'altra parte del modulo, questo effetto viene annullato. Il risultato è che quando lo specchio è in posizione, le forze da applicare alle strisce sono nulle. In entrambi i casi, non c'è bisogno di motori, con evidente risparmio di mezzi. Tuttavia la correzione, in corso di funzionamento, dei disallineamenti non è possibile. È possibile, invece, la correzione "off-line", per esempio di notte, sulla base delle informazioni acquisite durante il giorno.

Segue la descrizione delle varie simulazioni ottiche eseguite, sia su singoli componenti del concentratore, sia sul concentratore nel suo insieme.

Simulazioni

Il concentratore a specchi piani

Dato che questa è una soluzione accettabile come risultato finale del progetto, ed è schematizzabile ed analizzabile in maniera relativamente semplice, abbiamo simulato completamente l'effetto della gradinata composta da 65 moduli da $3 \times 3 \text{ m}^2$, disposti su 5 file e 13 colonne (Fig. 7).

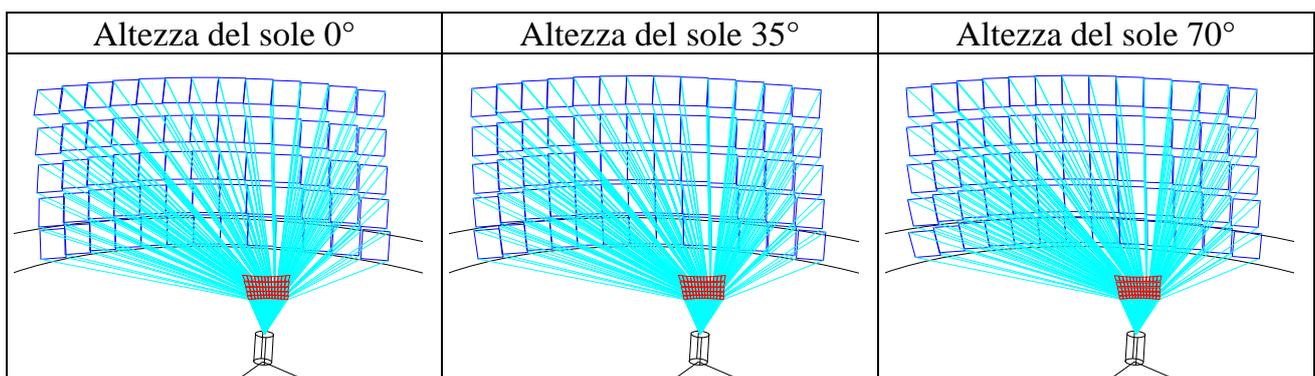


Figura 7: Le tre figure mostrano la disposizione degli specchi di un concentratore da 65 moduli (5 file di 13 colonne), a varie altezze del sole sull'orizzonte. In rosso lo specchio secondario.

L'efficienza è stata simulata sul un rivelatore (assorbitore) di dimensioni $60 \times 60 \text{ cm}^2$, trascurando le perdite dovute alla geometria della gradinata ed all'assemblaggio dei 100 specchi piani che compongono il modulo $3 \times 3 \text{ m}^2$. Le dimensioni del rivelatore permettono di visualizzare la forma dell'immagine del sole ottenuta con il concentratore. Abbiamo utilizzato una sorgente estesa per ogni modulo con una divergenza di 0.5° .

Abbiamo fatto una prima simulazione della configurazione 65 moduli a 35° con 5 moduli 3x3m² composti da 100 specchi piani di dimensioni 30x30 cm² (Fig. 8). L'efficienza ottenuta sul rivelatore è 93%. I moduli sono quelli nei quattro vertici del concentratore, più quello centrale (Fig. 9).

Simulando 15 moduli della configurazione "65 moduli a 35°", l'efficienza sul rivelatore è 94% (Fig. 10).

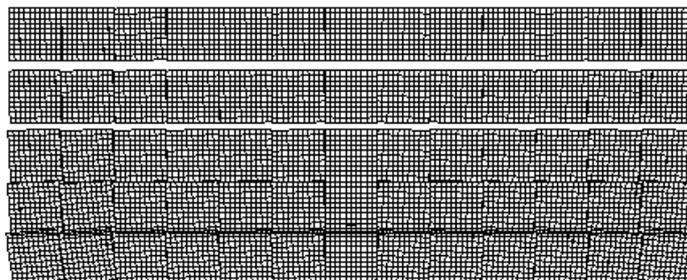


Figura 8: Vista frontale della gradinata della configurazione con 65 moduli di dimensioni 3x3m², composti da 100 specchi piani 30x30 cm².

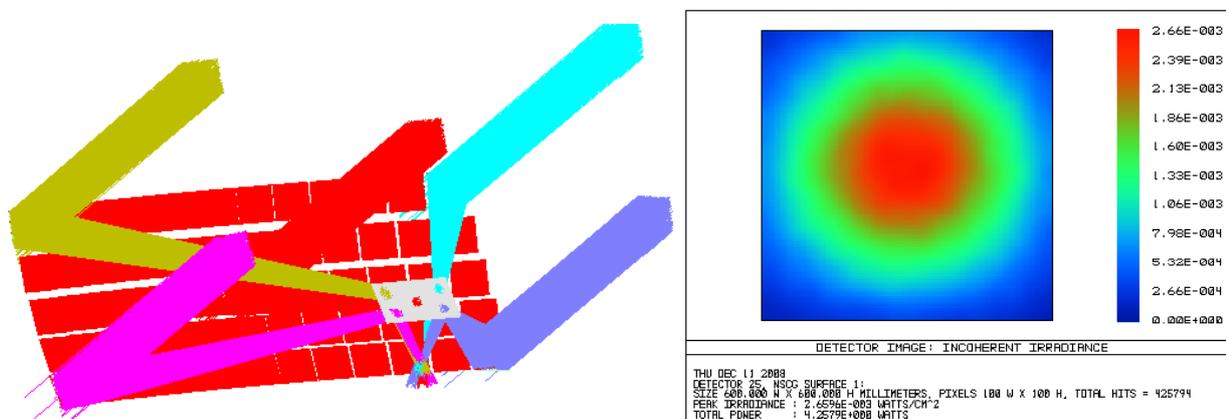


Figura 9: Soluzione 65 moduli, simulazione di 5 moduli, con altezza del sole sull'orizzonte 35° (sinistra). Forma corrispondente dell'immagine sul rivelatore (destra).

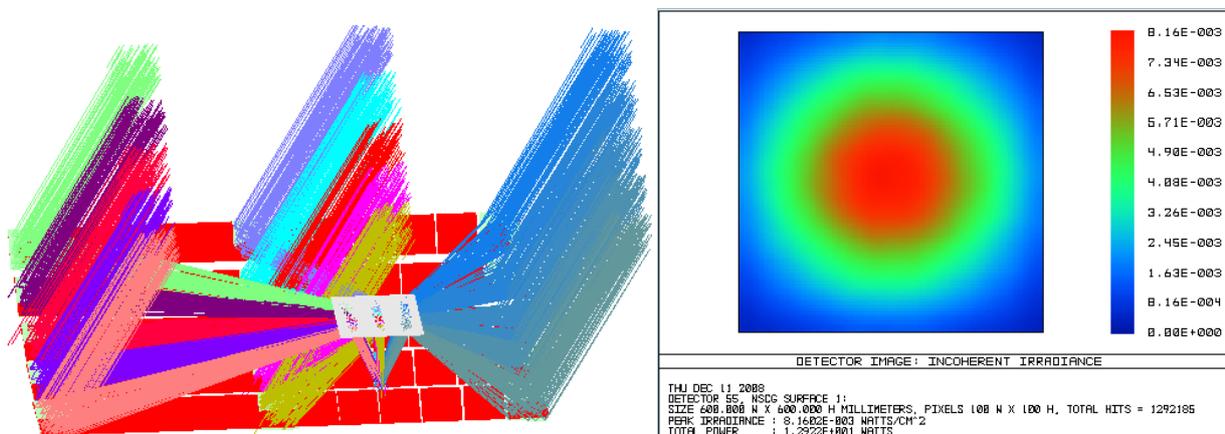


Figura 10: Soluzione 65 moduli, simulazione di 15 moduli, con altezza del sole sull'orizzonte 35° (sinistra). Forma corrispondente dell'immagine sul rivelatore (destra).

L'ultima simulazione della configurazione "65 moduli a 35°" è stata completata con i 65 moduli e l'efficienza risultante sul rivelatore è 95% (Figg. 11 e 12).

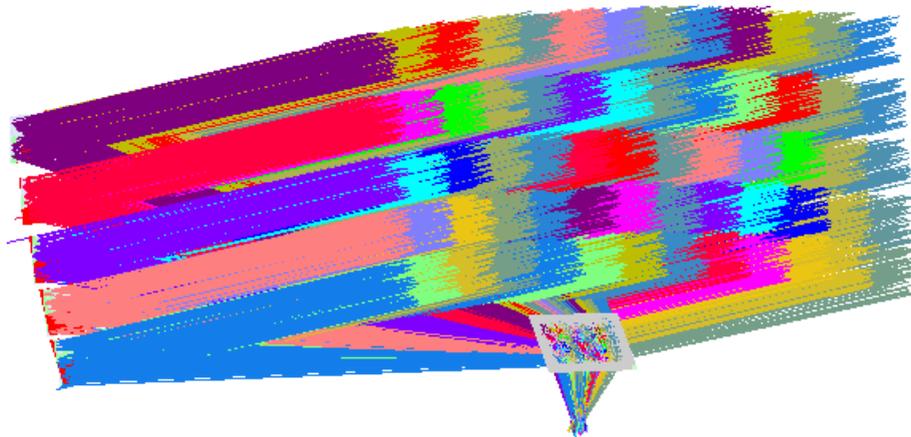


Figura 11: Soluzione 65 moduli, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 35°

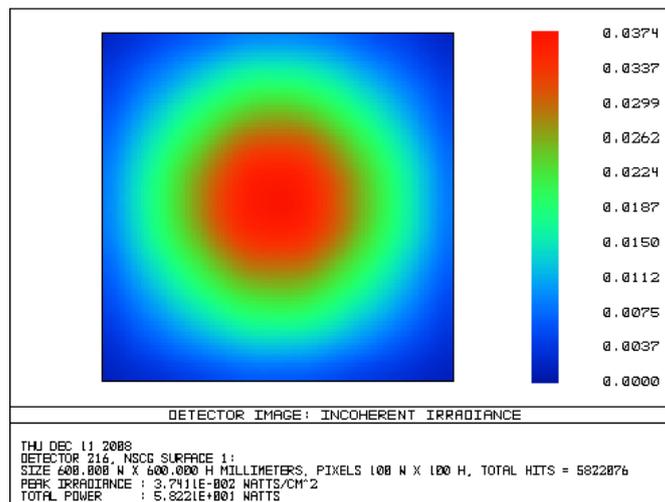


Figura 12: Spot sul rivelatore nella configurazione di Fig. 11

Abbiamo considerato un'altra configurazione che prevede 64 moduli da $3 \times 3 \text{ m}^2$, per un totale di 576 m^2 di specchio primario, organizzati in 16 colonne di 4 elementi ciascuna, montati su un binario di raggio tale che i centri degli specchi più bassi distano 26 metri dal centro di rotazione.

Nella simulazione della configurazione 64 moduli a 35° con 5 moduli $3 \times 3 \text{ m}^2$ composti da 100 specchi piani di dimensioni $30 \times 30 \text{ cm}^2$ abbiamo utilizzato la stessa sorgente e lo stesso rivelatore della configurazione con i 65 moduli. L'efficienza sul rivelatore è 90%.

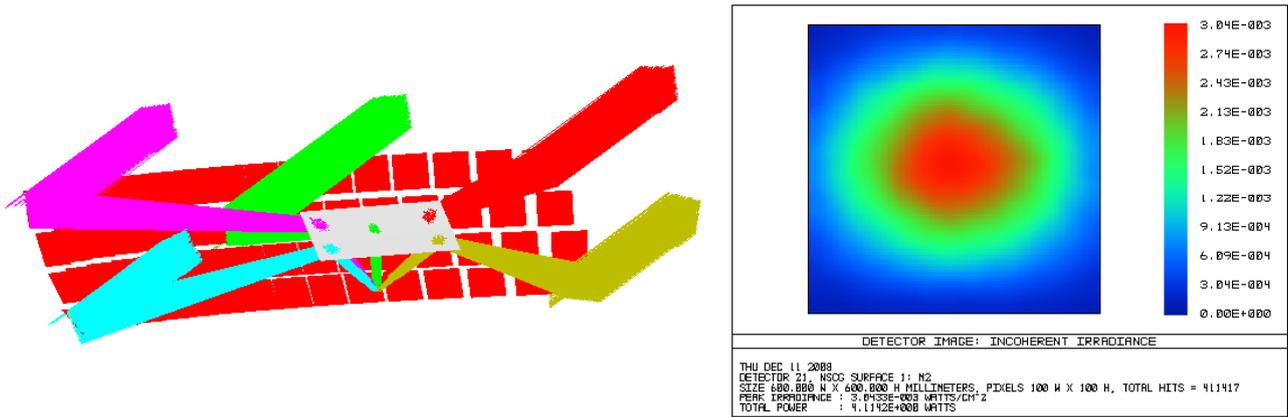


Figura 13: Soluzione 64 moduli, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 35° (sinistra). Spot sul rivelatore (destra).

Simulando 12 moduli della configurazione 64 moduli a 35° l'efficienza risultante sul rivelatore è 86%.

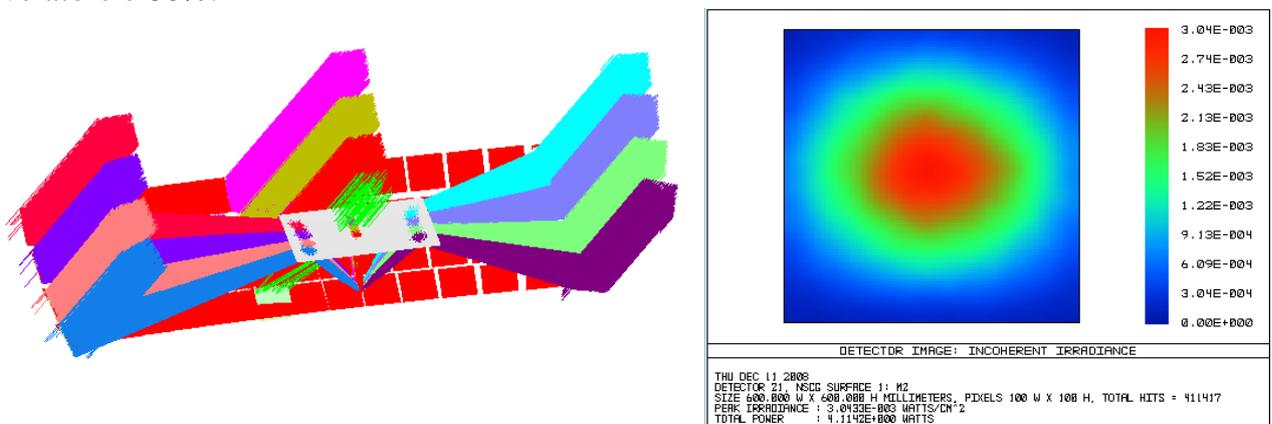


Figura 14: Soluzione 64 moduli, vista generale. Altezza del sole sull'orizzonte 35° (sinistra). Spot sul rivelatore (destra).

Si può notare, nelle Fig. 13 e 14, la forma leggermente allungata dell'immagine, rispetto alla configurazione con 5x13 moduli. Questo perché gli specchi più esterni sono in posizione più decentrata. Tale aspetto deve essere tenuto presente nella progettazione dell'ingresso del corpo nero.

Simulazioni di specchi curvi non adattivi

Esiste poi tutta una serie di possibili miglioramenti delle caratteristiche del concentratore, in funzione delle caratteristiche ottenibili dagli specchi. Il passo più semplice è quello di sostituire la striscia orizzontale di 10 specchi piani con un singolo specchio curvo, alto 30 cm e largo 300 cm (Fig. 15), movimentabile con le stesse caratteristiche descritte in precedenza.

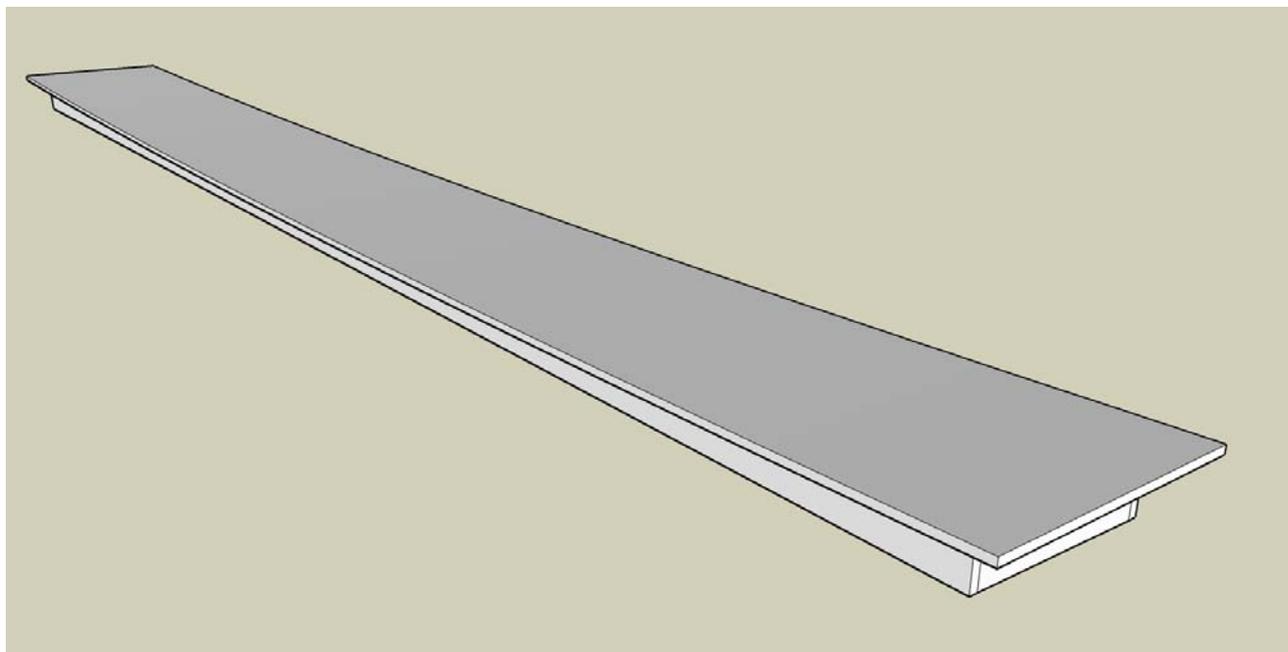


Figura 15: Schema dello specchio curvo

In questo caso, per una distanza focale di 35 metri, le dimensioni dell'immagine del singolo modulo passano da circa $60 \times 60 \text{ cm}^2$ a circa $30 \times 60 \text{ cm}^2$. In questo caso è fondamentale che la tecnica di assemblaggio dello specchio gli faccia assumere il profilo richiesto, dato che tale profilo non è più modificabile durante il funzionamento.

Un ulteriore passo in avanti, ove possibile, è quello di avere specchi curvi lungo due piani ortogonali. In questo caso la dimensione dell'immagine potrebbe scendere a $30 \times 30 \text{ cm}^2$, con evidenti miglioramenti della concentrazione. Ancora una volta, la possibilità di utilizzare specchi come questo dipende dai risultati di una sperimentazione.

Nelle Tabelle seguenti vengono illustrati i risultati delle simulazioni compiute sulle caratteristiche focali di sistemi in cui il singolo specchio non è adattivo, ma è adattivo l'involuppo degli specchi. Questo vuol dire che la focale del singolo specchio deve essere impostata al valore che assicura il fuoco minimo possibile durante l'escursione giornaliera dell'altezza del sole. Inoltre, da quanto segue si verifica che, quanto minore è l'altezza del singolo specchio, tanto minore è la dimensione verticale del fuoco. Il limite minimo è legato non più a considerazioni di tipo ottico, quanto piuttosto a considerazioni pratiche: ridurre l'altezza degli specchi vuol dire aumentarne il numero, con ovvie complicazioni di tipo pratico legate al montaggio. C'è anche un problema di tipo tecnico relativo alla fabbricazione degli specchi, ovvero il fatto che, più piccolo lo specchio, più piccola la freccia del suo vertice. Questo può avere ripercussioni sulla focale effettiva degli specchi. Tuttavia, specchi piccoli sono più facilmente trasportabili, e se uno di loro si rompe il danno

è minore. Nel seguito le dimensioni verticali del fuoco sono sempre espresse in cm. Il tratto verticale blu indica la distanza di 25 m, scelta come fuoco nominale per la simulazione. È facilmente riconoscibile la forma del fascio concentrato dallo specchio, dalla quale si nota come il fuoco effettivo cambi fortemente con l'altezza del sole. Questo effetto è più pronunciato al diminuire della latitudine dell'impianto, in quanto il sole raggiunge altezze maggiori.

Altezza del singolo specchio 0.6 m

Focale (m)	Altezza del sole 0°	Altezza del sole 70°
27	26.3 cm 	28.1 cm 
28	28.0 cm 	26.9 cm 
29	29.0 cm 	24.5 cm 
30	31.4 cm 	23.5 cm 

Altezza del singolo specchio 1.5 m

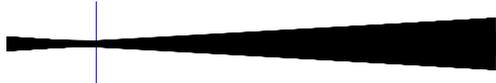
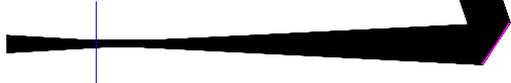
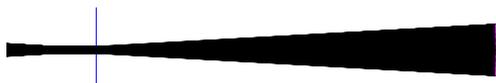
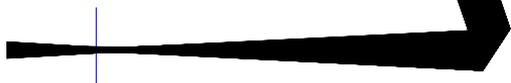
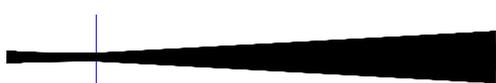
Focale (m)	Altezza del sole 0°	Altezza del sole 70°
27	33.9 cm 	40.3 cm 
28	39.0 cm 	35.9 cm 
29	43.3 cm 	31.7 cm 
30	47.0 cm 	26.9 cm 

Figura 17:

Possiamo sintetizzare i risultati nella Tabella seguente, dalla quale si evince che la focale migliore per specchi alti 0.6 m è tra 27 e 28 metri, quella per specchi alti 1.5 m è 28 metri, ma la dimensione verticale del fuoco aumenta del 37% circa, mentre il fattore di concentrazione cala di circa il 28%.

Focale (m)	Altezza del singolo specchio 0.6 m		Altezza del singolo specchio 1.5 m	
	0°	70°	0°	70°
27	26.3	28.1	33.9	40.3
28	28.0	26.9	39.0	35.9
29	29.0	24.5	43.3	31.7
30	31.4	23.5	47.0	26.9

Simulazione dell'adattività degli specchi

Fino ad ora abbiamo parlato di specchi con caratteristiche fisse. In realtà potremmo anche avere a disposizione specchi con raggi di curvatura modificabili durante la giornata, in particolare la curvatura in un piano verticale. La simulazione di questi specchi, in realtà, è la simulazione delle curve teoriche, risultanti dalle deformazioni imposte alla struttura.

Dal Dipartimento di Meccanica ci sono state sottoposte alcune curve, che descrivono la forma, nella direzione verticale, di una superficie, in origine con 60 metri di raggio di curvatura, che sia stata deformata per ottenere 50 metri di raggio di curvatura.

Per simulare la variazione di efficienza introdotta dal cambiamento del raggio di curvatura, abbiamo simulato una striscia cilindrica verticale, di dimensioni 300x30 cm², con i raggi di curvatura di 60 m (a simmetria cilindrica) e 50 m (a simmetria parabolica, cubica e con un profilo di 4° grado).

La sorgente utilizzata è estesa di dimensioni 300 x 30 cm², con divergenza 0.5°, sia con incidenza normale che a 30° rispetto all'asse ottico.

Configurazione a 0°

Il primo caso preso in considerazione è quello di una striscia di dimensioni 300x30 cm² e raggio di curvatura $R = 60$ m, ovvero la striscia di partenza. Nelle Figg. 16 e 17 sono visualizzati i risultati di due simulazioni identiche, a parte il fatto che nella seconda le dimensioni del rivelatore sono state rimpicciolite, in modo da selezionare solo la parte di segnale più intensa. Questo perché può non essere conveniente allargare la bocca del corpo nero, in modo da lasciar entrare tutta la radiazione. Più il corpo nero è largo, più irraggia, in maniera uniforme, rispetto alla superficie. Quindi c'è una dimensione ottimale, oltre la quale la potenza persa è più di quella in ingresso.

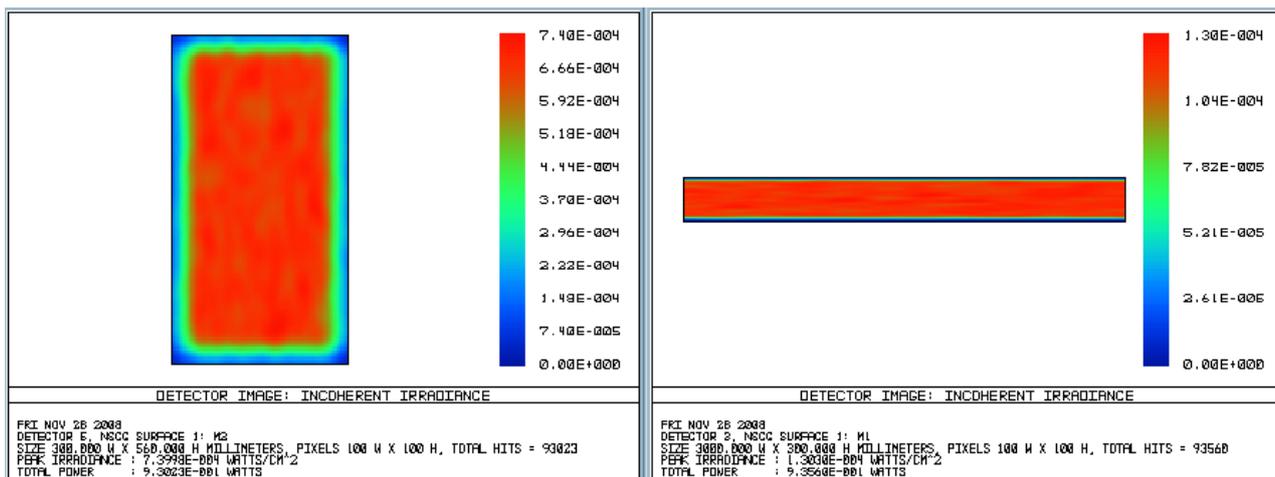


Figura 16: Spot su un rivelatore di 30x56 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia 300x30 cm² e R = 60 m (destra).

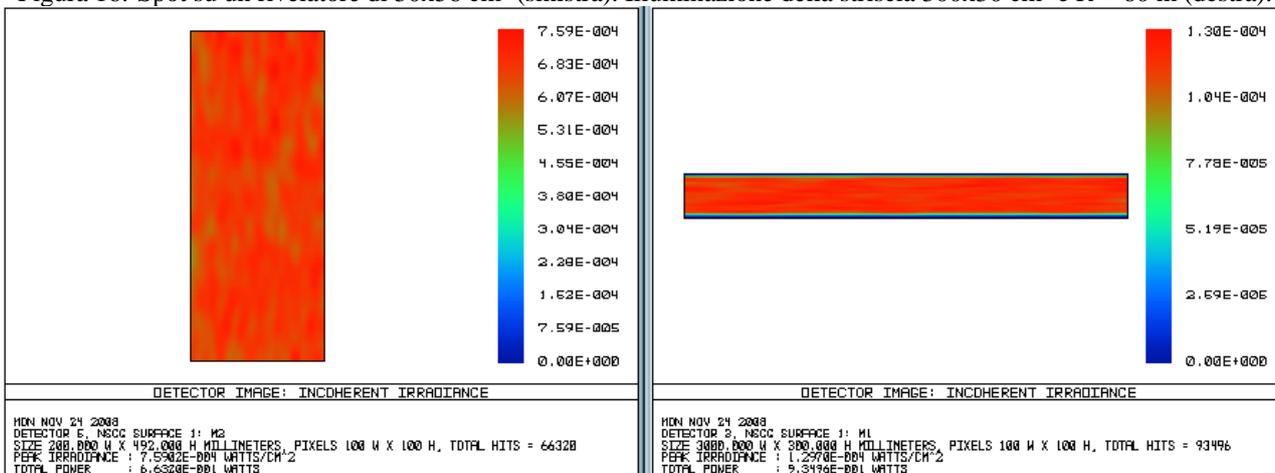


Figura 17: Spot su un rivelatore di 20x49.2 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia 300x30 cm² e R = 60 m (destra).

La Fig. 18 mostra lo studio di una striscia di dimensioni 300x30 cm² e raggio di curvatura R = 50 m, con profilo polinomiale di 2° grado nella forma $y=ax^2+bx+c$, ovvero una parabola. Il fuoco è più piccolo che nel caso precedente, dato il fatto, descritto all'inizio di questo rapporto, che il sole è una sorgente estesa.

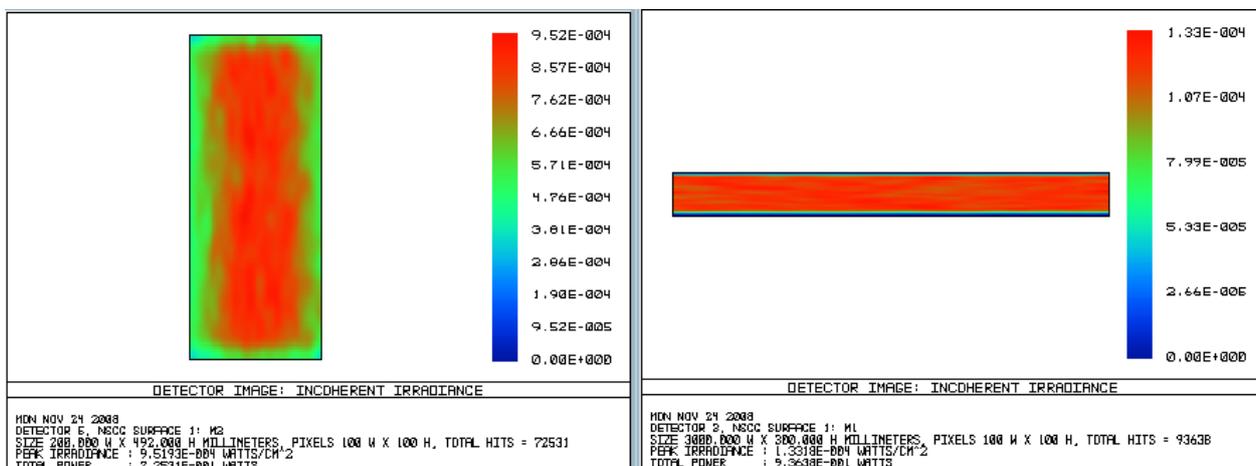


Figura 18: Spot su un rivelatore di 20x49.2 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia 300x30 cm², R = 50 m e deformata parabolica (destra).

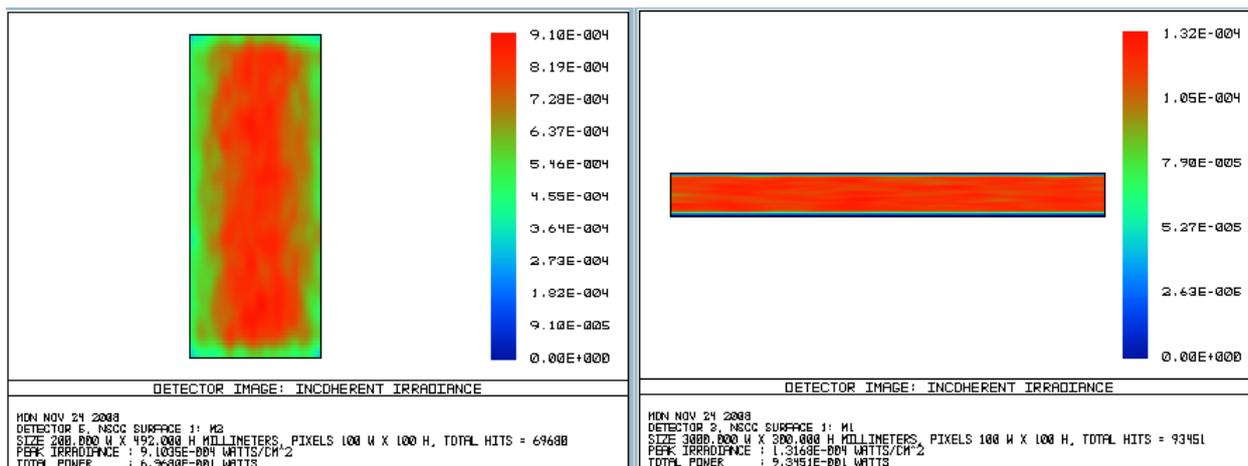


Figura 19: Spot su un rivelatore di 20x49.2 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia da 300x30 cm², R= 50 m e deformata cubica (destra).

La Fig. 19 mostra la simulazione di una striscia di dimensioni 300x30 cm² e raggio di curvatura R = 50 m, con un profilo polinomiale di 3° grado della forma $y=ax^3+bx^2+cx+d$. Nella Fig. 20 il profilo è polinomiale di 4° grado, ovvero della forma $y=ax^4+bx^3+cx^2+dx+e$.

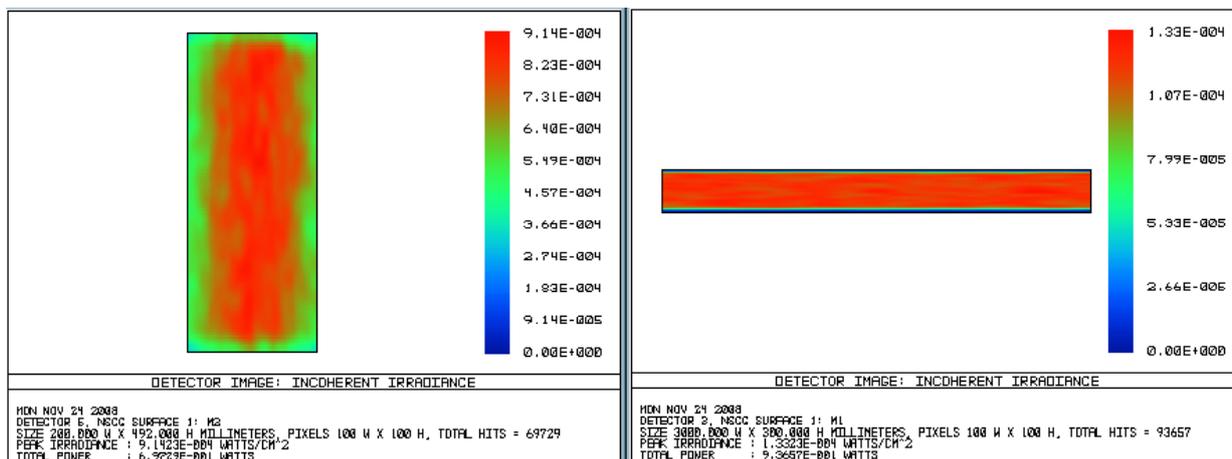


Figura 20: Spot su un rivelatore di 20x49.2 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia da 300x30 cm², R = 50 m, avente come deformata un polinomio di 4° grado (destra).

Configurazione 30°

Nelle figure che seguono, le simulazioni sono state fatte per il caso del sole a 60° di altezza rispetto all'orizzonte, quindi con angolo di incidenza sulla striscia di 30°. Come nel caso recedente, il rivelatore è stato scelto prima a dimensioni tali da prendere tutto il segnale, poi è stato ristretto per selezionare solo la porzione corrispondente al caso delle figure precedenti. Le Figg. 21 e 22 rappresentano quindi la stessa striscia, di dimensioni 300x30 cm² e raggio di curvatura R = 60 m, con due rivelatori, uno di 34x57 cm² e l'altro di 20x49.2 cm². Si tratta, ancora una volta, della striscia di partenza, con profilo cilindrico.

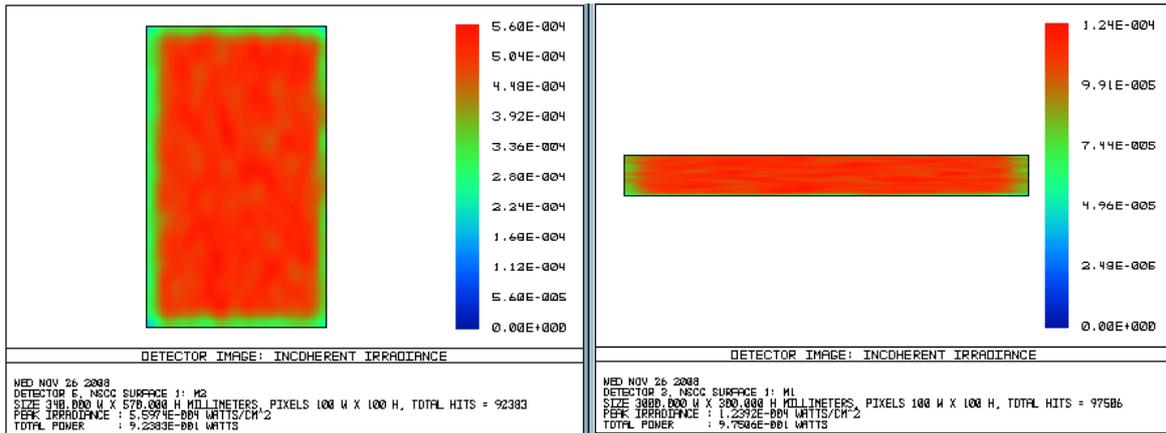


Figura 21: Spot su un rivelatore di $34 \times 57 \text{ cm}^2$ (sinistra). Illuminazione della striscia (cilindrica) da $300 \times 30 \text{ cm}^2$ e $R = 60$ m (destra).

Le Figg. 23 e 24 fanno riferimento alla striscia con deformata parabolica, con focale di 25 metri. La Fig. 25 si riferisce alla striscia con deformata cubica, le Figg. 26 e 27 alla striscia avente come deformata un polinomio di 4° grado.

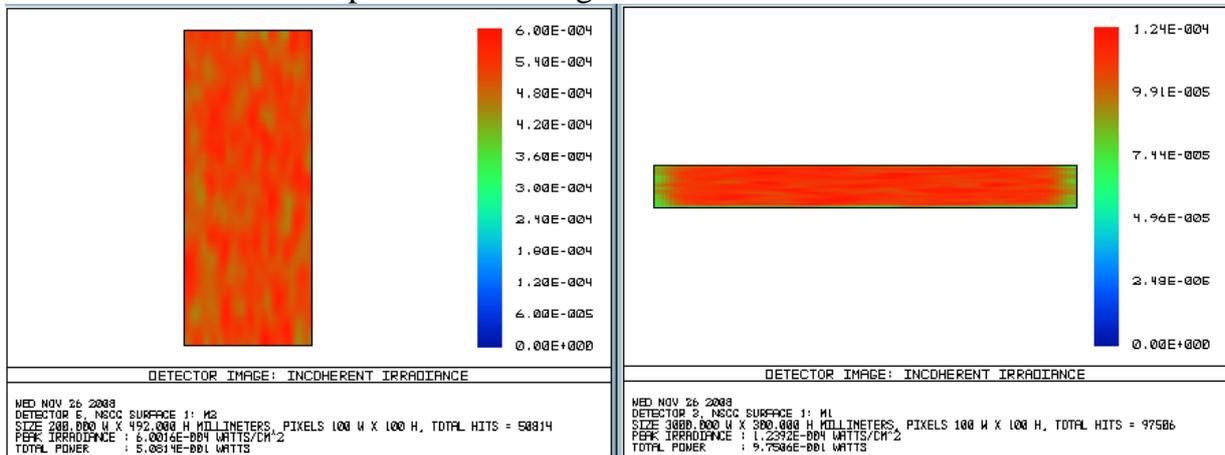


Figura 22: Spot su un rivelatore di $20 \times 49.2 \text{ cm}^2$ (sinistra). Illuminazione della striscia (cilindrica) da $300 \times 30 \text{ cm}^2$ e $R = 60$ m (destra).

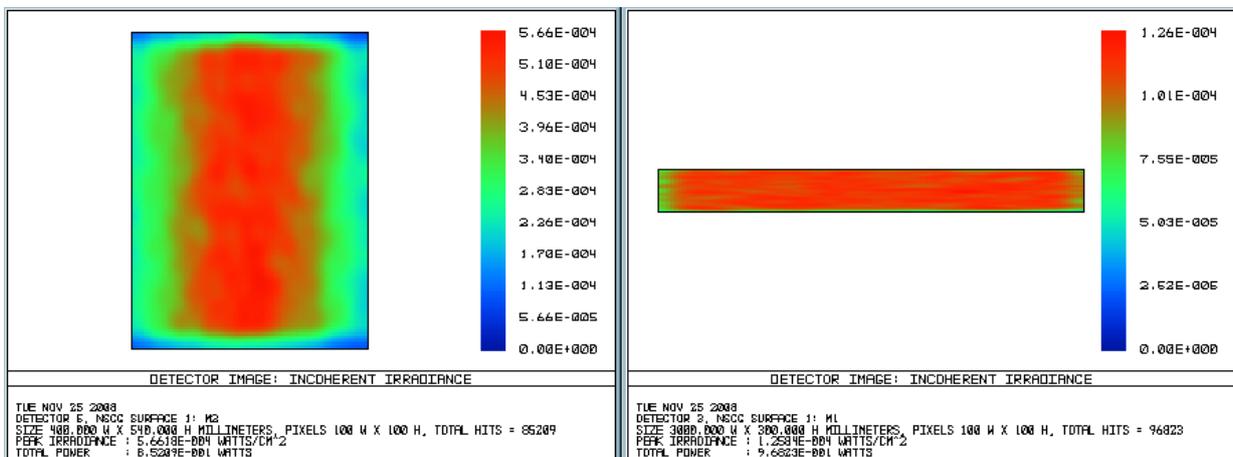


Figura 23: Spot su un rivelatore di $40 \times 54 \text{ cm}^2$ (sinistra). Illuminazione della striscia (parabolica) da $300 \times 30 \text{ cm}^2$ e $R = 50$ m (destra).

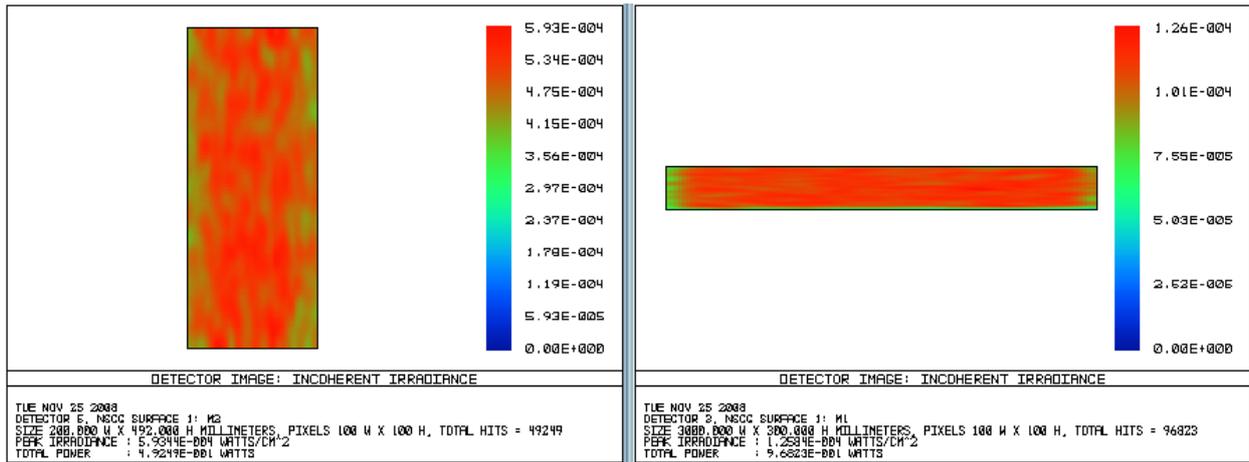


Figura 24: Spot su un rivelatore di 20x49.2 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia (parabolica) da 300x30 cm² e R = 50 m (destra).

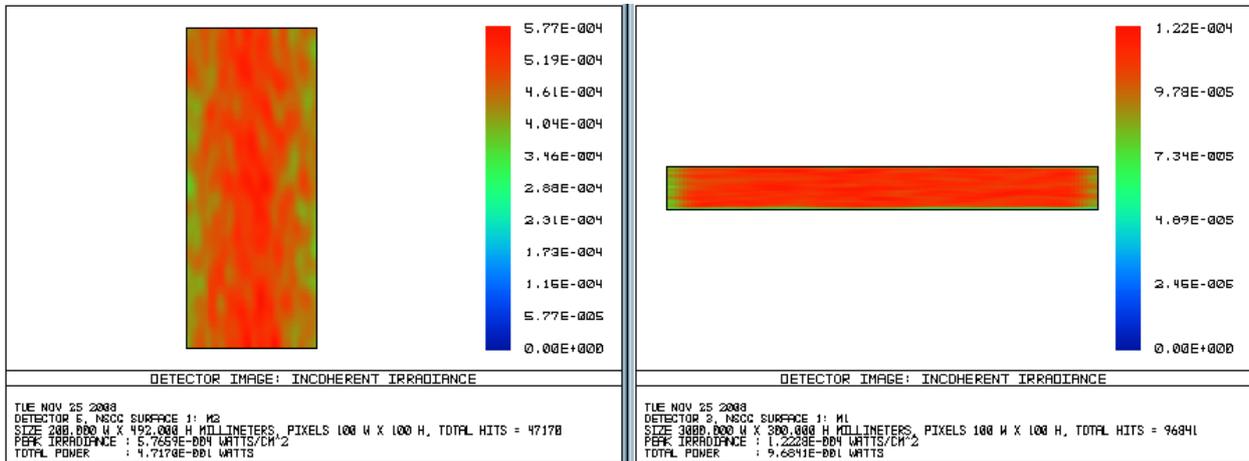


Figura 25: Spot su un rivelatore di 20x49.2 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia da 300x30 cm², R = 50 m e deformata cubica (destra).

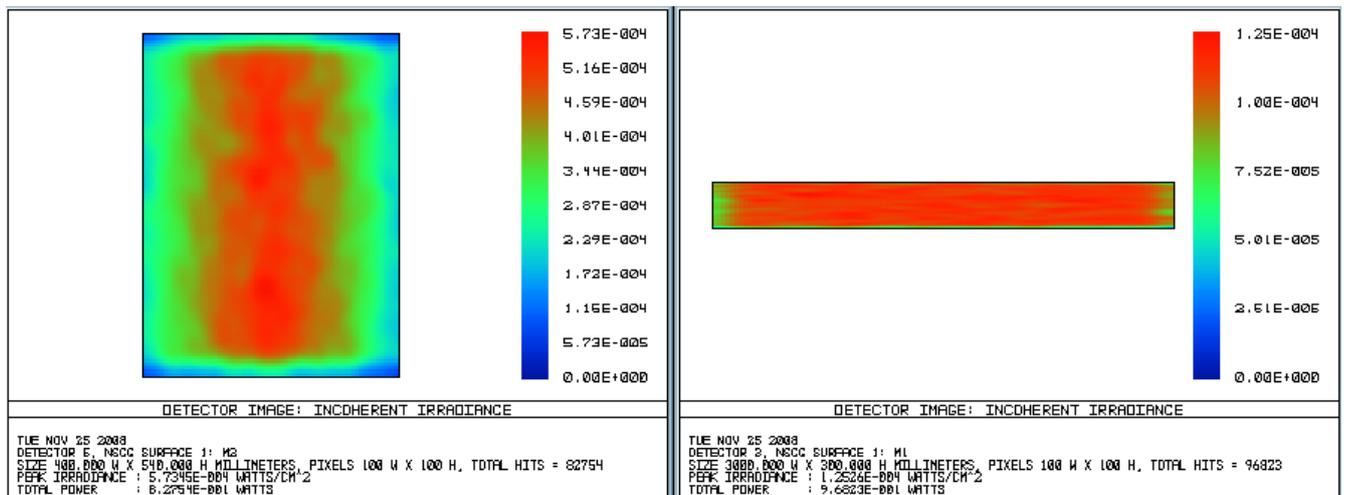


Figura 26: Spot su un rivelatore di 40x54 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia da 300x30 cm², R = 50 m, avente come deformata un polinomio del 4° grado (destra).

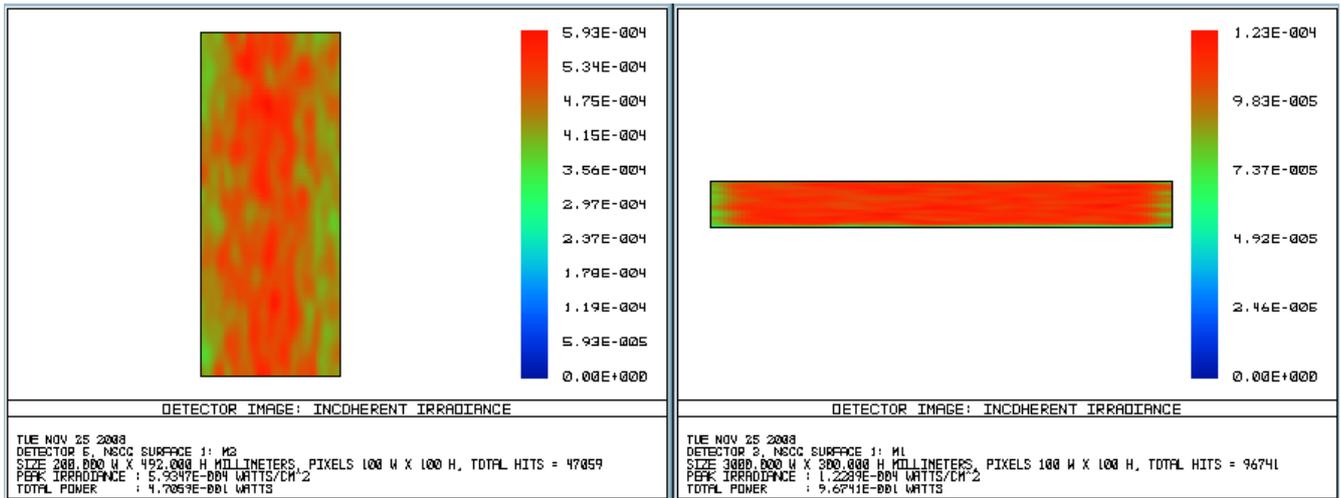


Figura 27: Spot su un rivelatore di 20x49.2 cm² (sinistra). Illuminazione della striscia da 300x30 cm², R = 50 m, avente come deformata un polinomio del 4° grado (destra).

I risultati sono riassunti nella seguente tabella:

Dimensioni rivelatore	Configurazione 0°		Configurazione 30°	
	20 cm x 49.2cm		20 cm x 49.2 cm	40 cm x 54 cm
Striscia R=60m	71%	99.43% dim_riv 30x56	52.11%	94.67% dim_riv_34x57
Striscia R=50m parabola	77.46%		50.86%	88%
Striscia R=50m cubica	74.56%		48.71%	85.51%
Striscia R=50m Pol. del 4° grado	74.45%		48.64%	85.47%

Dalla tabella si evince che la forma della striscia con più alta efficienza è quella parabolica, in pieno accordo con la teoria.

Ulteriori simulazioni verranno effettuate, in funzione delle decisioni finali di Progetto e dei risultati delle sperimentazioni degli specchi.