



Grande Progetto Solare Termodinamico

Copia di

Classificazione SOL/RS/2005/24

Distribuzione Libera

Progetto

Unità Ricerca e Sviluppo

Misura della distribuzione del flusso della radiazione solare concentrata mediante *collare fotovoltaico*: limiti, prototipi e prime misure.

A. Benedetti, L. Gentilin, A. Maccari, A. Mittiga*, M. Montecchi, A. Parretta**

(*) ENE-FORI Casaccia

(**) indirizzo attuale ENE-AGE Bologna

Sommario: dopo una breve rassegna dei possibili metodi di misura del flusso della radiazione solare concentrata, il metodo del collare fotovoltaico è brevemente descritto e i suoi limiti discussi. Sono poi descritti i due prototipi di collare finora realizzati e le misure con essi eseguite. Il primo prototipo, sviluppato in Casaccia, alloggia una singola fotocella della SunPower e ha permesso di verificarne la resistenza e valutarne il degrado su campo. Il secondo, sviluppato a Portici, dispone di 11 fotocelle e fornisce informazioni sulla forma della distribuzione di flusso in tempo reale. La forma della distribuzione misurata differisce notevolmente da quella prevista per concentratori a profilo parabolico ideale; è invece in buon accordo con le previsioni basate sulle misure profilometriche disponibili per due pannelli appartenenti alla fornitura attualmente installata nel collettore B.

	A. Benedetti					
	L. Gentilin					
	A. Maccari					
	A. Mittiga					
	M. Montecchi					
0	A. Parretta		Resp. Progetto		M. Vignolini	
Rev	Autori	Data	Convalida	Data	Approvazione	Data

Grande Progetto Solare Termodinamico

LISTA DI DISTRIBUZIONE

**Misura della distribuzione del flusso della radiazione solare concentrata
mediante *collare fotovoltaico*: limiti, prototipi e prime misure.**

Classificazione

SOL/RS/2005/24

1. Introduzione

La misura della distribuzione del flusso della radiazione concentrata dai pannelli riflettenti sulla superficie del tubo ricevitore è rilevante sia al fine di valutare un valore di soglia di resistenza da richiedere al CERMET, sia per valutare gli effetti delle deviazioni dal profilo parabolico ideale dei pannelli concentratori utilizzati in PCS. Tale misura è fortemente condizionata dalla presenza del tubo di vetro, di raggio 57.5 mm (62.5 mm nella versione più recente), coassiale al tubo ricevitore vero e proprio, di raggio 35 mm. Il tubo di vetro consente di realizzare una barriera di isolamento termico, ottenuta praticando il vuoto nell'intercapedine con il ricevitore.

Finora sono stati proposte tre diverse metodologie di misura:

1. Campionamento del flusso mediante uno o più fotorivelatori disposti lungo un collare; tale dispositivo andrà montato, esternamente, attorno al tubo di vetro.
2. Deduzione della distribuzione di flusso dall'analisi della radiazione diffusa o da un apposito schermo, o dal vetro o dal CERMET stesso.
3. Spostamento del fuoco della parabola all'esterno del tubo ricevitore mediante specchio piano e misura del flusso con un fotorivelatore rotante attorno all'asse focale così ottenuto, lungo la superficie di interesse.

Allo stato attuale, in ENEA, solo la prima metodologia è stata perseguita fino alla realizzazione di due prototipi funzionanti. Della seconda è stata studiata la teoria e condotte alcune prove in laboratorio su schermi diffusivi piani; mentre la terza è stata appena abbozzata.

Dopo aver discusso i limiti del sistema di misura a *collare*, saranno esposti i risultati delle prove condotte con i due *collari* sviluppati in ENEA.

2. Limiti degli apparati a *collare* e configurazione alternativa

Negli apparati a *collare* il flusso di radiazione è misurato mediante celle fotovoltaiche. D'altra parte la superficie del tubo ricevitore vero e proprio è resa inaccessibile dal tubo di vetro di raggio 57.5 mm (62.5 mm nella versione più recente), coassiale al ricevitore, utilizzato per costituire la barriera di isolamento termico. A meno di rimuovere l'intero ricevitore o di deflettere il fascio concentrato, la (le) celle fotovoltaiche devono essere disposte esternamente al tubo di vetro; il che equivale a misurare la distribuzione del flusso di radiazione su una superficie diversa da quella di interesse, di raggio 35 mm. La forma della distribuzione di flusso può essere notevolmente differente tra la superficie di misura e quella effettiva del ricevitore. Ad esempio, come mostrato in Fig. 2.1, un riflettore con il profilo del pannello Arcacompositi AC01, a mezzogiorno concentra la radiazione solare sul ricevitore secondo una distribuzione che differisce sensibilmente da quella che si osserverebbe con i due prototipi di collare finora sviluppati aventi raggio 73 e 100 mm, specialmente in prossimità dei bordi della zona illuminata.

D'altra parte, per poter risalire alla distribuzione di flusso su una superficie diversa da quella di misura è necessario propagare il fronte d'onda; ma questa operazione richiede la conoscenza non solo della intensità, ma anche della fase. Purtroppo, di fatto, la fase non è misurabile nel sistema in esame e quindi il problema è insolubile.

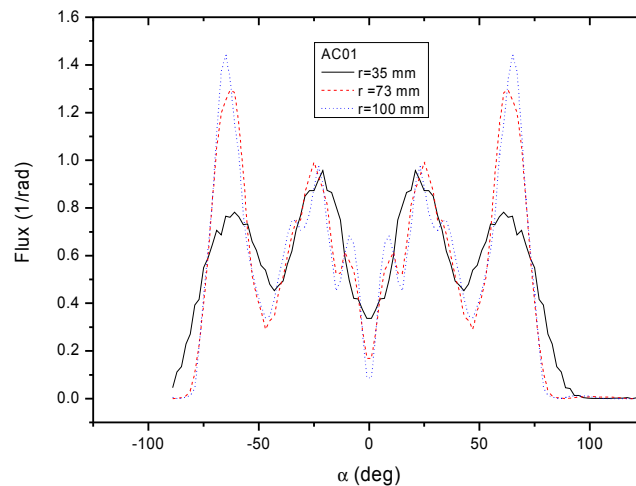


Fig. 2.1: distribuzione del flusso su superfici di diverso raggio.

Dunque, nella migliore delle ipotesi, integrando sull'angolo giro, sarà possibile stimare solo la potenza che attraversa la superficie cilindrica di misura. Anche con questo limite, però si pone un altro problema: a meno di schermare opportunamente le celle fotovoltaiche, non è detto che tutta la potenza misurata da ognuna di esse sarebbe integralmente intercettata dal ricevitore. Come mostrato in Fig. 2.2A, per alcune orientazioni il raggio è intercettato dalla cella, ma non dal ricevitore.

Con l'introduzione di una fenditura infinitesima (B) la misura è senz'altro corretta; per essere considerata infinitesima, è sufficiente che la larghezza della fenditura sia circa 1/100 del lato della cella. Più precisamente, considerato che i *collari* finora sviluppati utilizzano celle fotovoltaiche della SunPower di superficie quadrata, di lato 11 mm, e che, nel caso del *collare* sviluppato in Casaccia, la distanza della cella dal centro del ricevitore è 73 mm, la fenditura andrebbe posta a 8.59 mm dalla cella, con un angolo di visuale α di 32.63° (vedi figura).

Di contro, l'utilizzo di una fenditura infinitesima comporta che anche la porzione della superficie del cilindro di raggio $73 + 8.59$ mm misurata sia infinitesima; quindi la ricostruzione della distribuzione di flusso, che come mostrato in Fig 2.1 può avere una forma piuttosto irregolare, richiede un grande numero di passi angolari. Per contenere i tempi di misura, si dovrebbe pertanto prevedere la rotazione motorizzata del fotorivelatore lungo il collare; tale necessità rende piuttosto complessa la realizzazione di un prototipo che adotti questa soluzione. Di fatto nessuno dei due prototipi finora sviluppati ha seguito questa strategia.

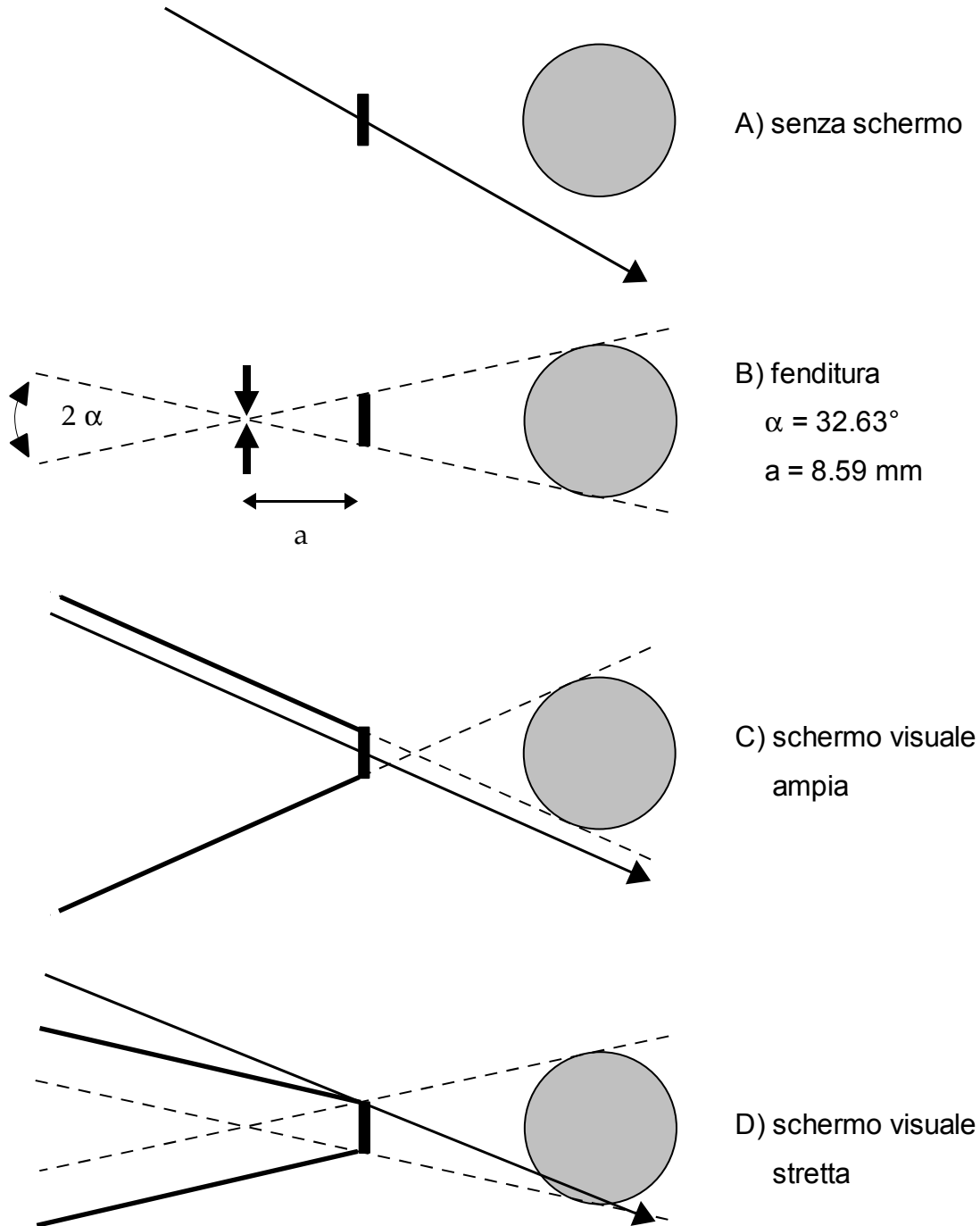


Fig. 2.2: l'utilizzo di una cella non schermata (A) comporta la possibilità di una notevole sovrastima della potenza effettivamente intercettata dal ricevitore. L'introduzione di fenditure o schermi può risolvere totalmente o parzialmente il problema, ma sempre con qualche inconveniente (vedi il testo). Il raggio del ricevitore è 35 mm. La cella fotovoltaica della SunPower è quadrata di lato 11 mm; nel caso B) il valore di α e a è stato calcolato assumendo la cella a 73 mm dal centro del ricevitore.

Uno schermo a visuale ampia (C), riduce enormemente il numero di passi angolari, ma non esclude di sovrastimare la potenza; invece uno schermo a visuale stretta (D) può comportare una sottostima. Si potrebbe quindi misurare il flusso due volte, utilizzando i due schermi per poi considerare un valore medio, ma anche questa soluzione allo stato attuale è piuttosto complessa.

Data la complessità della problematica sollevata dalla tecnica del *collare*, è conveniente ricercare configurazioni di misura alternative. Ad esempio una possibilità è quella di deflettere i raggi riflessi con uno specchio piano posto vicino al tubo ricevitore, in modo da spostare fisicamente il fuoco e poter eseguire la misura su una superficie cilindrica di raggio 35 mm coassiale al nuovo fuoco nominale. Come mostrato in Fig. 2.3 uno specchio piano, parallelo all'asse del tubo ricevitore e ortogonale all'asse della parabola, riflette i raggi in prossimità del ricevitore; la zona focale è così riflessa verso lo stesso pannello riflettente e la posizione nominale è la simmetrica del centro del ricevitore rispetto al piano riflettente. In figura è mostrato il funzionamento in incidenza obliqua, condizione necessaria per evitare l'effetto ombra dello specchio piano qualora la sua larghezza trasversale (al tubo) sia molto maggiore del diametro del tubo stesso. D'altra parte qualora lo specchio sia posto vicinissimo al tubo di vetro, sarebbe sufficiente una larghezza trasversale di poco superiore al diametro del tubo di vetro stesso, e quindi l'effetto ombra sarebbe trascurabile e il sistema potrebbe operare anche ad incidenza normale dei raggi solari. Inoltre, riducendo la distanza dal ricevitore, si minimizzerebbe l'effetto di eventuali errori di allineamento del modulo di misura con il pannello concentratore.

Come mostrato in Fig. 2.4, al fine di velocizzare l'acquisizione, il sistema di misura potrebbe essere costituito da un singolo fotorivelatore accoppiato a una sfera integrante di diametro 70 mm messa in rotazione in modo che la porta di ingresso ruoti sulla superficie cilindrica di interesse ($r = 35$ mm). Munendo l'equipaggio rotante di un trigger, sarebbe possibile acquisire il segnale come una onda periodica; ogni tratto di questa onda corrisponderebbe quindi al flusso relativo a un certo arco della superficie cilindrica in esame. Se poi tutto il modulo di misura potesse viaggiare su delle guide parallele al ricevitore, sarebbe possibile eseguire rapidamente la misura del flusso lungo tutta un modulo del filare di riflettori.

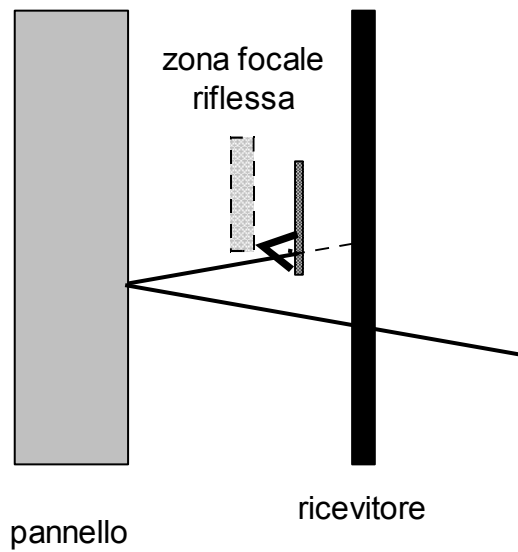


Fig. 2.3: spostamento della zona focale mediante specchio piano. Lo schema è una visione dall'alto (basso) della parabola e del tubo ricevitore.

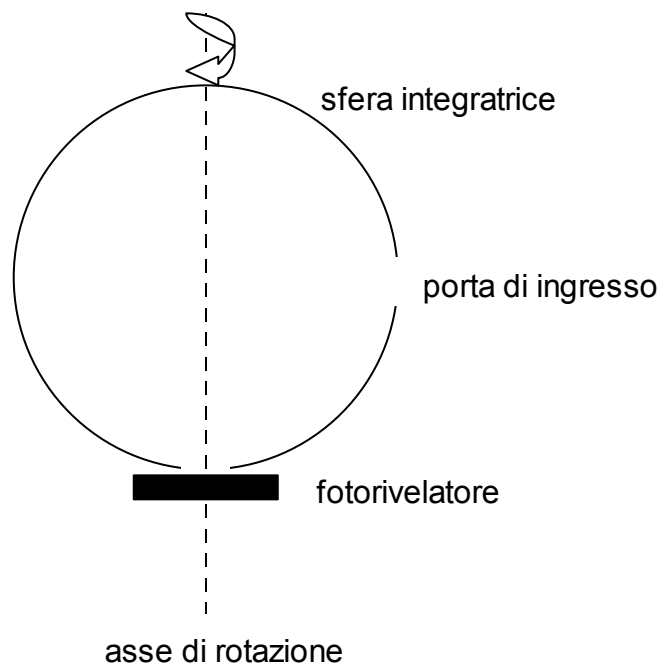


Fig. 2.4: rivelatore rotante.

3. Collare Mittiga-Gentilin (Casaccia)

Questo prototipo è stato ideato da A. Mittiga (ENEA-FORI) e L. Gentilin ed è stato realizzato interamente in Casaccia avvalendosi, per le lavorazioni meccaniche, di M. Rattè (ENEA-FORI)

3.1 Caratteristiche

Il collare è costituito da un semplice tubo di anticorodal, separabile in due parti per consentirne il montaggio sul tubo ricevitore; esso alloggia una sola cella fotovoltaica. Il suo schema è mostrato in Fig. 3.1.

Il collare è munito di due schermi d'acciaio che, oltre a limitare il riscaldamento, selezionano le direzioni dei raggi incidenti come discusso nel paragrafo precedente. In particolare lo schermo adottato è del tipo a visuale ampia (tipo C, Fig. 2.2), il che non consente di escludere una possibile sovrastima del flusso di radiazione.

La cella fotovoltaica utilizzata è una HECO252 prodotta dalla SunPower; adatta alla conversione di intensità luminose fino a 250 kW/m^2 . La sua area attiva è un quadrato di lato 11 mm.

La temperatura della cella durante il funzionamento è misurata da una termocoppia ferro-costantana (tipo J) incollata direttamente sotto il substrato di allumina della cella stessa.

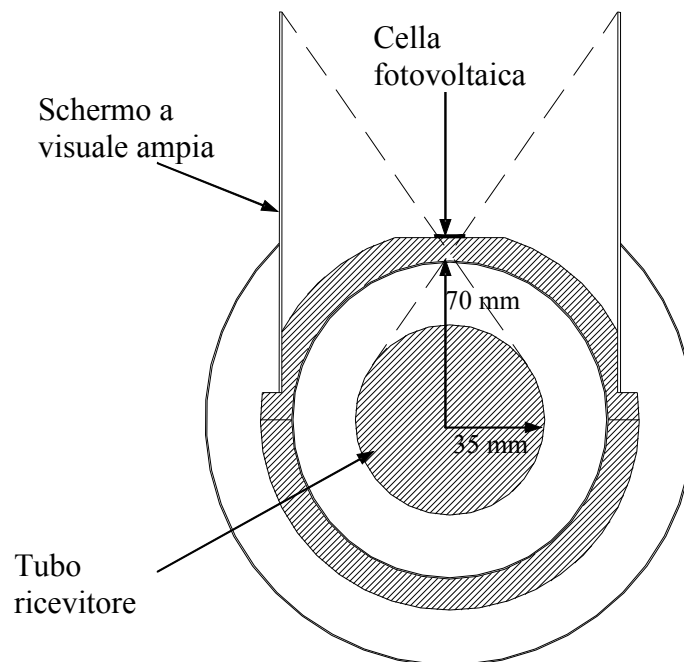


Fig. 3.1: schema del collare Mittiga-Gentilin montato su ricevitore.

I segnali di misura sono portati all'ingresso dei moduli convertitori collocati alla base degli specchi e quindi trasferiti al sistema di acquisizione dati.

La cella fotovoltaica montata sul collare completo di schermi è stata tarata con un simulatore solare classe A: sotto una illuminazione AM1.5G ($1000\text{W}/\text{cm}^2$) produce 48.2 mA di corrente di cortocircuito. Per facilitare la misura tale corrente passa in uno shunt da $0.015\ \Omega$ nominali: la tensione misurata ai capi dello shunt sotto illuminazione AM1.5G è 0.71 mV. Tale valore è stato usato per convertire i valori di tensione acquisiti dal DAS dell'impianto PCS in valori di irradianza.

3.2 Montaggio e collaudo

Il collare è stato montato a circa mezzo metro di distanza (verso ovest) da un braccetto di sostegno del tubo.

Nella prima giornata di misura (27 Luglio 2004) il collare è stato orientato in maniera che la cella non si trovasse sull'asse della parabola, dove ci si aspetta un minimo di irradianza a causa di diversi fenomeni (separazione tra le due semiparabole, ombreggiamento del tubo, proprietà geometriche del profilo), ma in corrispondenza del massimo di irradianza rivelato dalle "bruciature" dei sostegni del tubo. In questa prima prova la posizione angolare della cella non è stata misurata accuratamente perché lo scopo era di verificare solo il buon funzionamento generale del dispositivo.

Le figure 3.2 e 3.3 mostrano, rispettivamente, l'andamento dell'irradianza media vista dalla cella e della temperatura della cella misurata dalla termocoppia. L'intensità della luce incidente sulla cella è stata dedotta dall'intensità della radiazione diretta (misura RT-6.001 del DAS) correggendola per il fattore geometrico $\cos(i)$ dove i è l'angolo tra l'asse del paraboloide e la direzione della radiazione. L'irradianza media vista dalla cella è stata calcolata supponendo che sia proporzionale alla tensione ai capi dello shunt ($0.71\ \text{mV}$ equivalenti a $1\ \text{kW}/\text{m}^2$) e applicando il coefficiente di correzione per la temperatura fornito dal costruttore ($0.04\ \%$ per grado $^{\circ}\text{C}$).

Un primo risultato positivo è che nonostante le alte temperature raggiunte ($>160\ ^{\circ}\text{C}$) la cella ha continuato a funzionare correttamente.

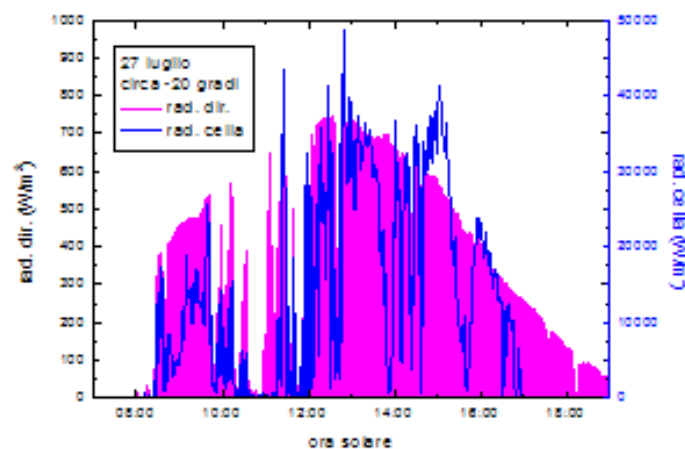


Fig. 3.2: intensità della radiazione diretta (viola) e concentrate (blu) sulla superficie cilindrica di raggio 73 mm nella prova del 27 Luglio 2004.

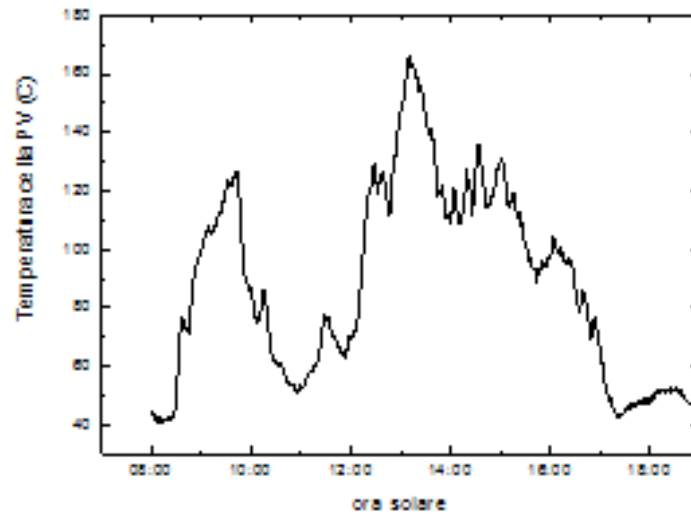


Fig. 3.3: temperatura della cella fotovoltaica nella prova del 27 Luglio 2004.

Sia la temperatura che la corrente (proporzionale all'irradianza) presentano però notevoli variazioni non direttamente correlabili con l'andamento dell'intensità della radiazione diretta (riportato in viola nella figura 3.2). Le variazioni di temperatura sono meno rapide di quelle della risposta in corrente, e questo è facilmente spiegato dalla capacità termica del collare. Si nota anche una buona correlazione tra le fluttuazioni di temperatura e quelle di corrente. Possiamo quindi dedurre che effettivamente la cella è stata sottoposta ad un irraggiamento con forti variazioni non spiegabili solo in base ad eventi atmosferici (nubi e pioggia).

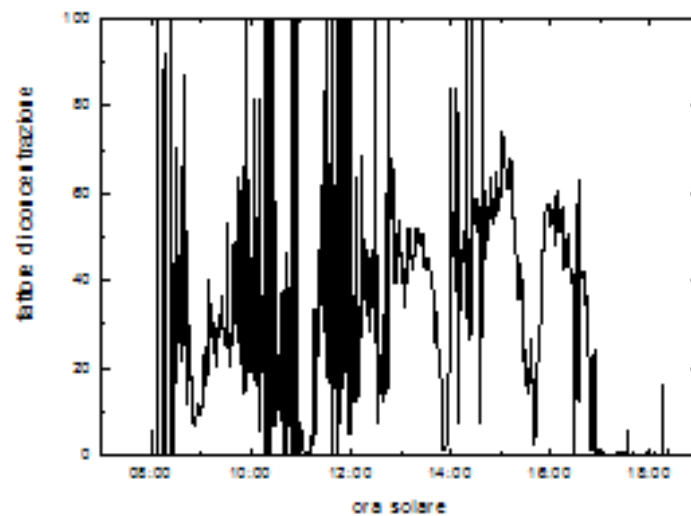


Fig. 3.4: fattore di concentrazione sul cilindro di raggio 73 mm nella prova del 27 Luglio 2004.

La scarsa correlazione con l'irradianza è ancora più evidente se consideriamo il fattore di concentrazione ottenuto dal rapporto tra l'intensità della radiazione incidente sulla cella fotovoltaica e quella incidente sullo specchio, mostrato in Fig. 3.4, che è ben lontano dall'essere una costante.

Tali variazioni possono essere indotte da:

- 1- le zone di separazione tra le diverse sezioni di specchio;
- 2- le differenze di posizionamento o di accuratezza di profilo tra le diverse sezioni di specchi;
- 3- gli sfasamenti temporali tra l'oscuramento del sensore di radiazione diretta e l'oscuramento della cella fotovoltaica.

3.3 Misure di irradianza in funzione dell'angolo

Disponendo di una sola fotocella, per poter risalire alla forma della distribuzione di flusso è necessario eseguire una serie di misure orientando di volta in volta il collare in modo che l'angolo tra la perpendicolare alla cella e l'asse della parabola ricopra interamente e senza sovrapposizioni l'intervallo di maggior interesse. La cella ha un lato di 11 mm e si trova a 73 mm dal centro del tubo, ne consegue che il passo angolare ottimale è di 9 gradi. Dalle proprietà geometriche degli specchi e del collare risulta che l'intervallo angolare di interesse è di 225 gradi (± 112.5 gradi dall'asse del paraboloide). Perciò per coprire tutta la zona illuminata servirebbero 25 misure ad angoli diversi. Di qui appare chiara la necessità di utilizzare un collare che alloggi diverse celle al fine di ridurre i tempi di misura.

Nell'attesa dello sviluppo di un collare di questo tipo, tra Agosto e Settembre 2004, sono state comunque effettuate alcune misure ad angoli diversi. In particolare, il collare è stato posizionato in un punto fisso del tubo ricevitore e doveva essere ruotato in una posizione diversa ogni mattina. Per alcune orientazioni del collare la misura è stata ripetuta per più di un giorno per controllare se le oscillazioni della fotocorrente della cella presentavano caratteristiche ricorrenti e quindi attribuibili a fattori geometrici. Inoltre, la posizione assunta come riferimento iniziale di 0 gradi è quella per cui la normale alla cella fotovoltaica interseca il vertice dello specchio parabolico. Il verso positivo è quello per cui, con gli specchi in posizione orizzontale (in cui guardano verso l'alto), la cella è rivolta verso nord.

In tabella 3.1 sono riportati i giorni di misura in cui il cielo attorno alle 12:00 solari era ragionevolmente sereno. Purtroppo, come già osservato, la notevole fluttuazione del segnale della fotocella non è giustificata dalla variazione dell'irraggiamento e rende poco comprensibili le misure risolte temporalmente. Per ottenere valori più significativi abbiamo dunque deciso di calcolare separatamente il valor medio dell'irraggiamento sulla fotocella e dell'irraggiamento efficace giorno per giorno in una finestra temporale prossima alle 12:00, per poi calcolare il loro rapporto (ultima colonna della tabella), equivalente ad una stima temporalmente incoerente del fattore di concentrazione. Rispetto alla media del

fattore di concentrazione (penultima colonna) i valori così ottenuti per la medesima orientazione in giornate diverse sono molto meno dispersi.

Tab. 3.1: misure collare Mittiga-Gentilin effettuate tra Agosto e Settembre 2004

data	θ (deg)	$T_{ini}-T_{fin}$	$\langle \text{rad cella} \rangle$ W/m^2	$\langle \text{rad sole} \rangle$ W/m^2	$\langle C \rangle$	$\langle \text{rad cella} \rangle /$ $\langle \text{rad sole} \rangle$
23-9-2004	-36	11:18-11:48	5636	286	31	19.7
3-9-2004	-18	11:45-12:15	45184	723	62.5	62.5
12-8-2004	-18	11:59-12:29	40857	714	57.1	57.2
13-8-2004	0	12:10-12:40	1056	625	7.4	1.7
27-8-2004	0	11:45-12:15	2405	746	3.2	3.2
30-8-2004	0	12:11-12:40	1702	237	26.3	7.2
8-9-2004	18	11:45-12:15	1235	781	1.6	1.6

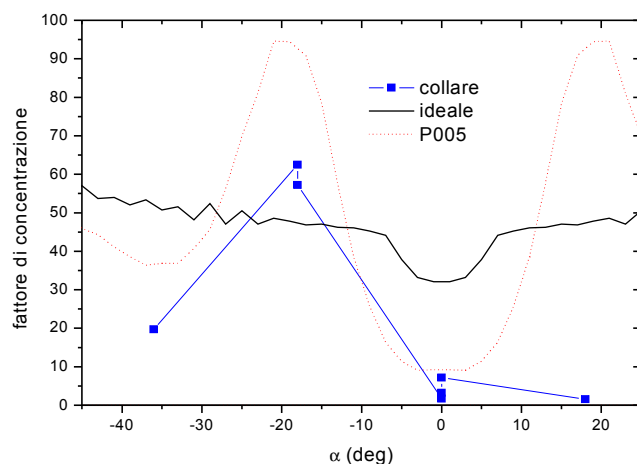


Fig. 3.5: andamento del fattore di concentrazione *incoerente* per diverse orientazioni del collare.

La Fig.3.5 mostra l'andamento angolare del fattore di concentrazione *incoerente*; l'accordo con l'andamento previsto per un concentratore parabolico ideale è piuttosto scarso. Considerando invece il profilo di un pannello reale prodotto dalla Powerwall (P005), misurato in precedenza con il profilometro ottico, l'entità della oscillazione del valore di concentrazione osservato è parzialmente giustificata. La forte asimmetria dell'andamento potrebbe essere indotta sia da una cospicua differenza tra la forma dei due pannelli a semiparabola che concentravano la radiazione solare sul collare, che da un allineamento pannello-tubo_ricevitore asimmetrico, forse addirittura accompagnato da un'imperfezione nell'inseguimento solare.

3.4 Degradazione della cella fotovoltaica

Durante la campagna di misure, la cella fotovoltaica è stata sottoposta ad alti valori di irradianza e ad alte temperature. Mentre l'intensità della luce concentrata non ha mai raggiunto il valore massimo dichiarato (250 kW/m^2), la temperatura ha ampiamente superato il valore massimo di funzionamento indicato dal costruttore ($100 \text{ }^\circ\text{C}$). Tuttavia il dispositivo è rimasto operativo pur risultando modificate le sue caratteristiche elettriche. La Fig. 3.6 mostra le curve corrente-tensione misurate nel corso dell'utilizzo sull'impianto, mentre la tabella 3.2 mostra l'evoluzione dei parametri caratteristici della cella fotovoltaica.

Dopo più di due mesi di permanenza su campo il dispositivo ha subito nel complesso un notevole degrado, specie per quanto riguarda il Fill Factor (FF); fortunatamente il parametro di maggiore interesse per la misura in esame, ossia la corrente di cortocircuito ($I_{sc}=J_{sc}\cdot\text{Area}$), ha subito solo una modesta riduzione, pari al 5%. Tuttavia un peggioramento ulteriore del FF potrebbe richiedere, per una misura accurata della I_{sc} , l'uso di un convertitore corrente-tensione a bassa impedenza d'entrata al posto dello shunt. Lo shunt porta infatti il punto di lavoro dalla cella a qualche decina di mV, condizione che potrebbe comportare la sottostima della misura della fotocorrente di celle degradate.

Tab. 3.2: degrado delle caratteristiche della fotocella.

data	g.g. lavoro	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF	Eff (%)
9 aprile	0	0.67	41.6	77.3	21.5
30 luglio	2	0.64	41.2	74.9	19.7
9 agosto	10	0.63	40.2	70.1	18.7
21 ottobre	60	0.64	39.6	64.6	16.4

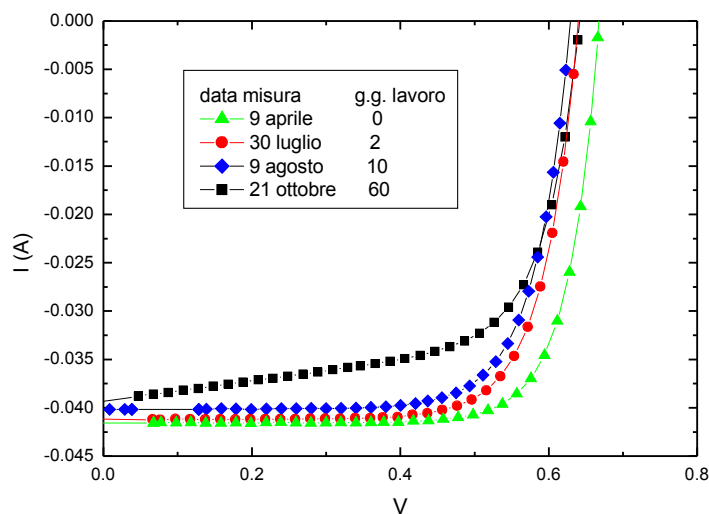


Fig. 3.6: degrado della curva corrente-tensione.

4 Collare Parretta (Portici)

Un secondo prototipo è stato sviluppato presso il C.R. ENEA di Portici, sotto la supervisione di A. Parretta, con la partecipazione di G. Nenna, M. Tucci, G. Flaminio e M. Pellegrino.

4.1 Caratteristiche

La Figura 4.1.1 mostra il collare sviluppato a Portici; è costituito da 11 celle della SunPower, dello stesso tipo (HECO252) di quella utilizzata nel collare Mittiga-Gentilin. Ogni fotocella è protetta da una finestra diffusiva ed è quindi investita dalla radiazione da essa trasmessa e diffusa.

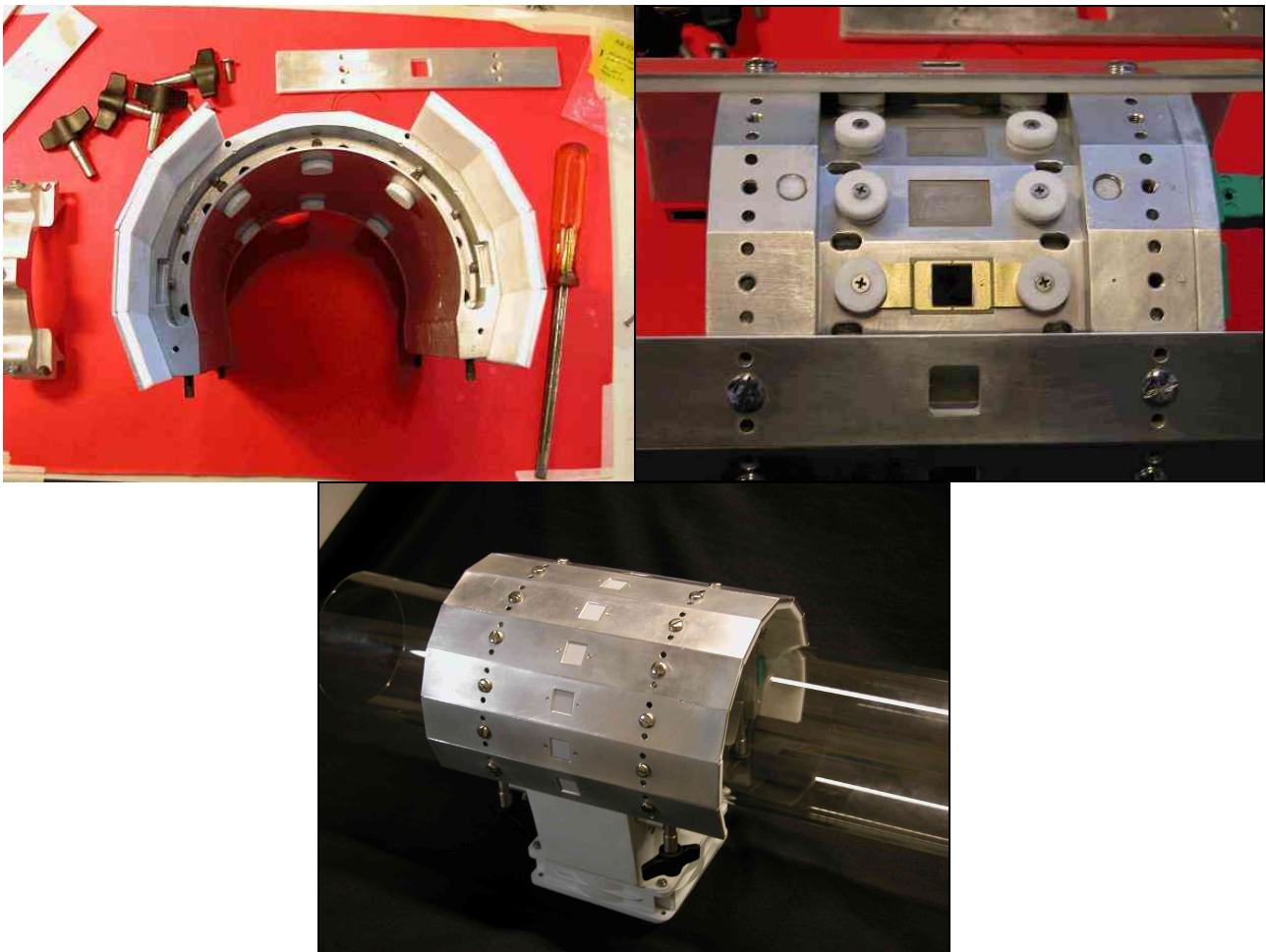


Fig. 4.1.1: collare (versione per tubo 115 mm) sviluppato al C.R. ENEA di Portici. E' costituito da 11 celle della SunPower modello HECO252, ognuna protetta da una finestra diffusiva, collocate lungo un arco di cerchio di 200 gradi e raggio 100 mm. In alto, collare in fase di montaggio; in basso, collare montato su tubo.

Il collare è stato inizialmente realizzato per operare su un cilindro di vetro di 115 mm di diametro. In questa versione le celle solari e le corrispondenti finestre diffusive erano disposte lungo un arco di cerchio di 216° (centro-centro) e diametro 140 mm e 160 mm rispettivamente. Successivamente alla realizzazione del collare, un nuovo tubo ricevitore è stato adottato su PCS, avente il diametro esterno di 130 mm. Come illustrato in Fig. 4.1.2, si è pertanto sezionato il collare in due parti, in corrispondenza della cella centrale (Fig.

4.1.1 in alto a destra), per poi ricongiungerlo aumentando di 14 mm l'apertura della bocca di innesto. In seguito a tale modifica, le dieci celle e finestre diffusive laterali non sono più centrate con l'asse del tubo, ma distribuite su due semicerchi posti fuori asse di 7 mm. La cella e la finestra centrali sono rimaste inalterate.

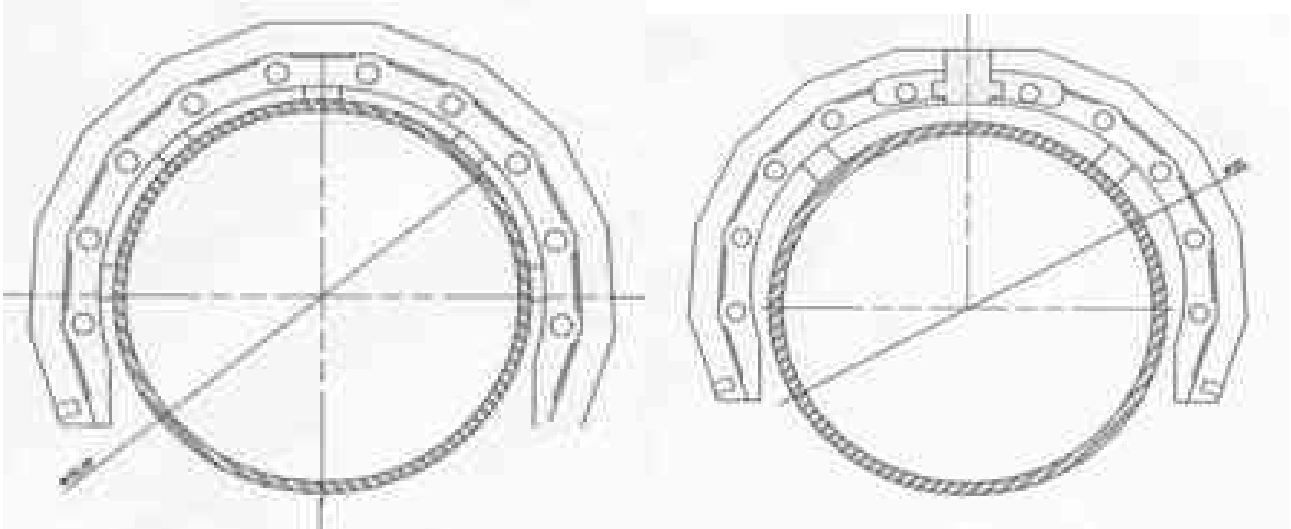


Fig. 4.1.2: sezione del collare versione 155 mm (sinistra) e versione modificata (destra).

Nella versione attuale del collare non sono stati adottati schermi per la luce concentrata incidente; pertanto, come è stato discusso nel paragrafo 2, non si ha la certezza che il ricevitore sia capace di intercettare tutta la radiazione rilevata dal collare. Schermi ottici opportuni possono essere inseriti in versioni successive del collare. La descrizione esaustiva del collare fotovoltaico sviluppato a Portici sarà presto riportata su relazione tecnica.

Contrariamente al caso del collare Mittiga-Gentilin, attualmente non si dispone della caratterizzazione delle fotocelle coperte dalle finestre diffusive. Pertanto non sarà possibile valutare il fattore di concentrazione dal segnale delle fotocelle.

4.2 Misura del 10 Agosto 2005

La Fig. 4.2 illustra la collocazione del collare sul ricevitore del collettore B dell'impianto PCS della Casaccia. Il collare è stato posizionato il più vicino possibile a uno dei braccetti di supporto del tubo ricevitore per ridurre lo stress sul tubo di vetro indotto dal peso del dispositivo stesso; più precisamente, è stato montato a EST del braccetto, subito dopo il rigonfiamento del vetro. In figura è ben visibile il fascio di cavi avvolto dall'isolante termico. I segnali delle fotocelle erano registrati su un datalogger, indipendente dal sistema informatico PCS, assieme a tre valori di temperatura: ambiente e in prossimità delle celle 5 e 7 a cavallo della cella mediana, 6. L'orologio del datalogger è stato sincronizzato manualmente.

E' degno di nota che il montaggio del collare ad EST del braccetto è ottimale per una sessione di misura antimeridiana perchè nel pomeriggio non è possibile escludere la possibilità di ombreggiamento del collare da parte del braccetto stesso. Sfortunatamente montaggio e cablaggio sono stati completati poco prima del mezzogiorno solare, e il collet-

tore B è andato in inseguimento a partire dalle 12:09:25 come riportato nel database di PCS.



Fig. 4.3: collare-Parretta sul ricevitore PCS nella misura del 10 Agosto 2005.

L'analisi dei dati acquisiti con il collare è effettuata a misura conclusa, scaricando su PC i dati immagazzinati nel datalogger unitamente alla porzione di interesse del database PCS. In particolare è stato sviluppato un software per la visualizzazione, animata o statica, della distribuzione di flusso registrata con il collare; tale software è stato concepito per poter essere utilizzato in modalità remota da qualsiasi postazione connessa in rete utilizzando il protocollo http.

Nelle prime ore del pomeriggio del 10 Agosto 2005 il cielo non era completamente sereno. La Fig. 4.3 mostra l'andamento della radiazione efficace registrata dalla centralina meteo del PCS. Da notare che l'acquisizione dati PCS è interrotta dalle 13:40 alle 13:45 e dalle 14:16 alle 14:20 a causa di ripetuti arresti e riavvii del sistema di acquisizione.

La distribuzione di flusso rilevata con il collare inizia ad essere apprezzabile in perfetta concomitanza all'entrata in inseguimento del collettore B (ore 12:10 circa), per poi contrarsi immediatamente a causa della forte riduzione della radiazione.

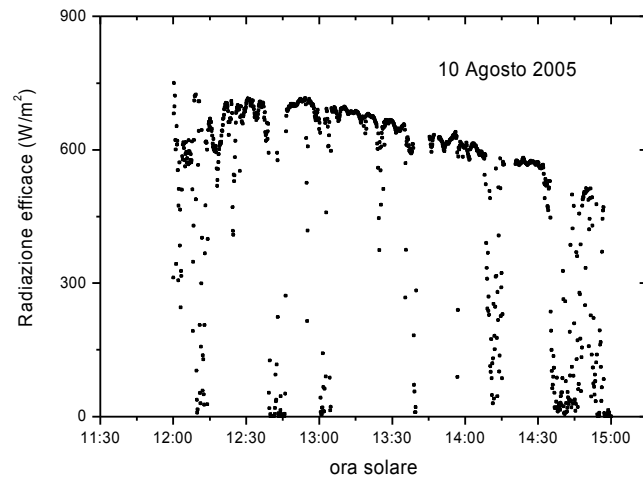


Fig. 4.3: radiazione efficace registrata in PCS nel primo pomeriggio del 10 Agosto 2005.

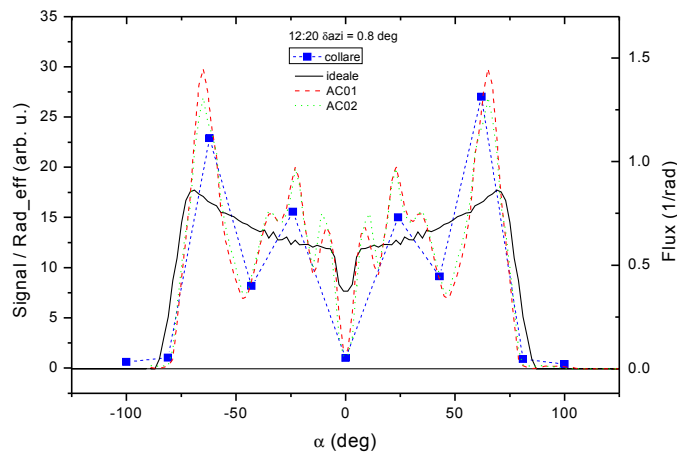


Fig. 4.4: distribuzione di flusso registrata alle 12:20 a confronto con le curve previste per un pannello ideale e due campioni prodotti dalla Arcacompositi.

Il periodo compreso tra le 12:14 e le 12:30 è abbastanza stabile e la distribuzione di flusso conserva la medesima forma; la Fig. 4.4 mostra la distribuzione osservata alle 12:20. Da notare che le 12:20 coincidono quasi al mezzogiorno effettivo solare, previsto per le 12:16:36, con un angolo di incidenza della radiazione solare sull'asse della parabola di 0.8° . La forma della distribuzione di flusso osservata differisce fortemente da quanto previsto per un concentratore parabolico ideale; invece è in ottimo accordo con la previsione basata sui dati sperimentali del profilometro ottico disponibili per due campioni (AC01 e AC02) appartenenti alla medesima fornitura di pannelli prodotti dalla Arcacompositi utilizzata alla data della misura nel collettore B di PCS. Le deviazioni del profilo e dell'arcotangente di questi due campioni sono mostrate in Fig. 4.5. Da notare che le deviazioni sono suffi-

cientemente contenute da non ridurre il fattore di intercettazione, cioè la porzione dei raggi riflessi e intercettati dal tubo ricevitore, pari rispettivamente a 0.997 e 1.000 per AC01 e AC02.

Dalle 12:30 alle 12:47 la forma diventa mutevole, talvolta azzerata dalla brusca riduzione della radiazione. La mutevolezza della forma fa sospettare un rilevante ombreggiamento del collare da parte del braccetto.

Dalle 12:48 alle 14:07 la distribuzione riprende la forma mostrata in Fig. 4.4 e si evolve gradualmente verso un maggiore livellamento dei valori massimi dei due picchi del lato sinistro ($\alpha = -62^\circ, -24^\circ$), vedasi le Fig. 4.6 e 4.7 relative alle 13:20 e alle 14:07.

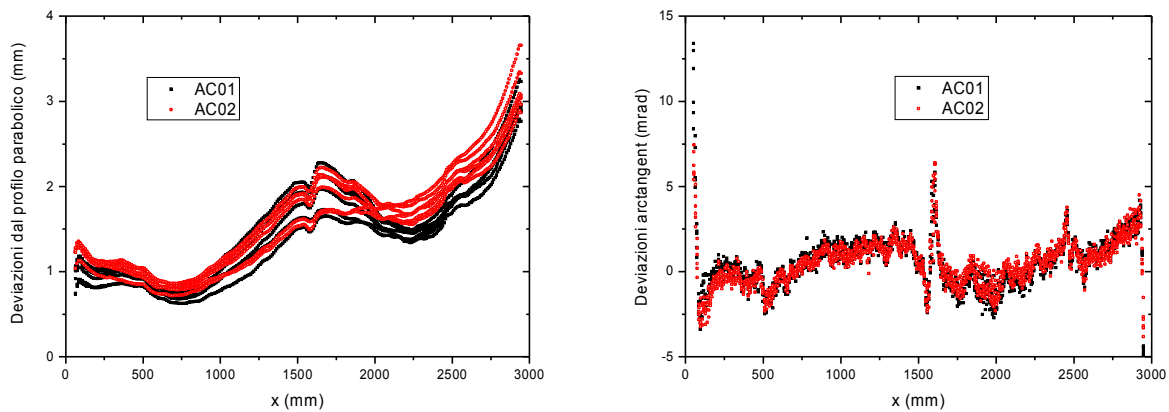


Fig. 4.5: deviazioni del profilo e dell'arctangente dalla parabola ideale per i campioni AC01 e AC02 dell'Arcacompositi. La misura profilometrica era stata condotta lungo 6 sezioni.

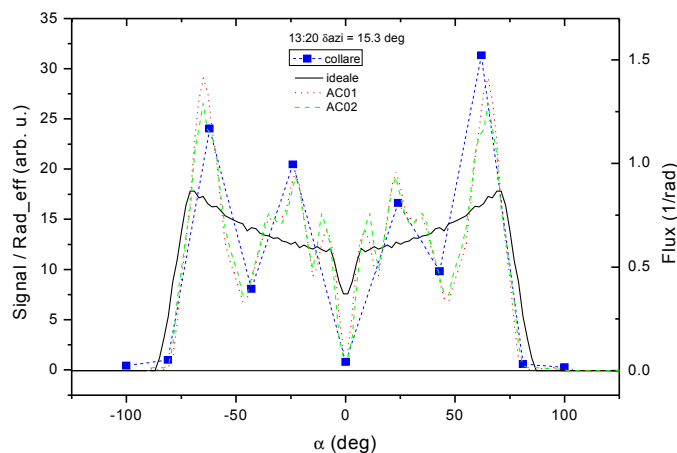


Fig. 4.6: profilo del flusso alle 13:20.

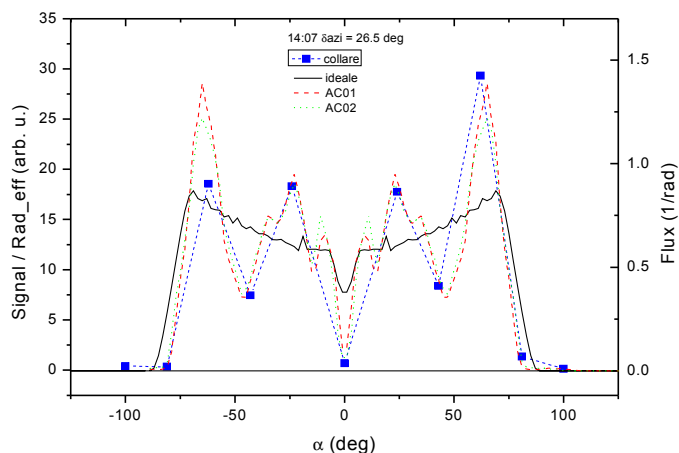


Fig. 4.7: profilo del flusso alle 14:07.

Dopo le 14:07 segue un periodo di instabilità del livello di radiazione e una decisa riduzione del segnale dei fotorivelatori relativi a $\alpha = \pm 62^\circ$; ad esempio in Fig. 4.8 è riportata la situazione osservata alle 14:20 dove il flusso ad $\alpha = \pm 24^\circ$ è maggiore di quello a $\alpha = \pm 62^\circ$. Questa tendenza però non trova riscontro con le previsioni ottenute per AC01 e AC02 e potrebbe essere solo un artefatto dovuto al posizionamento verso EST del collare rispetto al braccetto di sostegno del rivelatore o alle zone di separazione tra pannelli successivi.

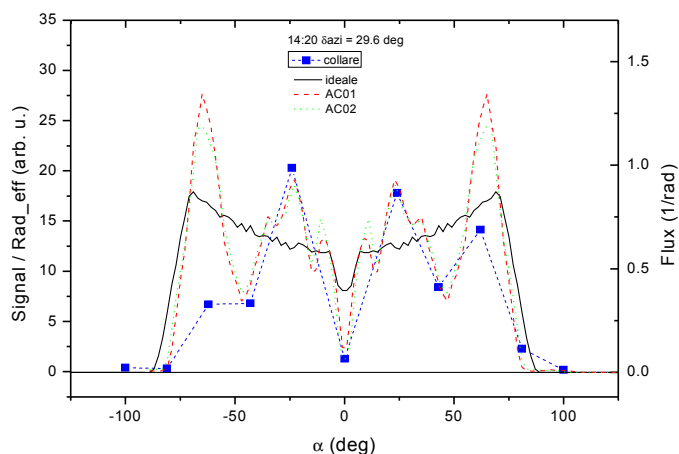


Fig. 4.8: profilo del flusso alle 14:20.

Oltre ad analizzare i segnali delle fotocelle, è importante controllare l'andamento della temperatura nelle tre diverse posizioni: ambiente e attiguate alle fotocelle 5 e 7. La Fig. 4.9 mostra l'andamento della temperatura osservata. La temperatura massima non supera 80°C , valore inferiore al limite superiore dichiarato dalla SunPower per il corretto funzionamento delle fotocelle.

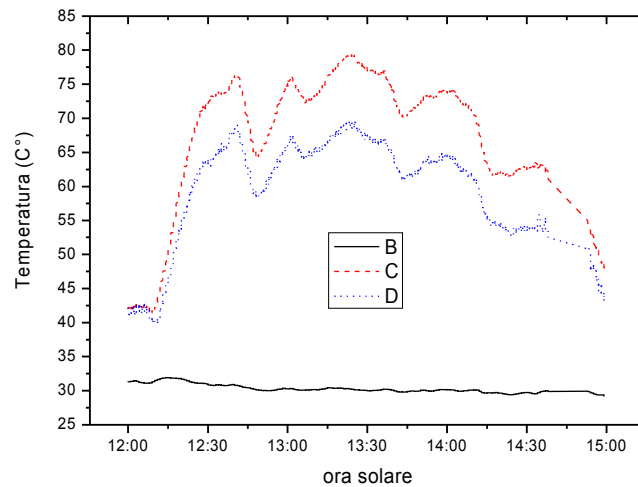


Fig. 4.9: temperatura.

4.4 Misura del 28 Ottobre 2005

L'interpretazione delle misure effettuate il 10 Agosto è resa più complessa dal passaggio di corpi nuvolosi. Si è così deciso di eseguire una nuova misura in una giornata completamente serena; l'occasione si è presentata il 28 Ottobre 2005. La Fig. 4.10 mostra il collare montato sul ricevitore del collettore B, a OVEST di uno dei braccetti di sostegno.

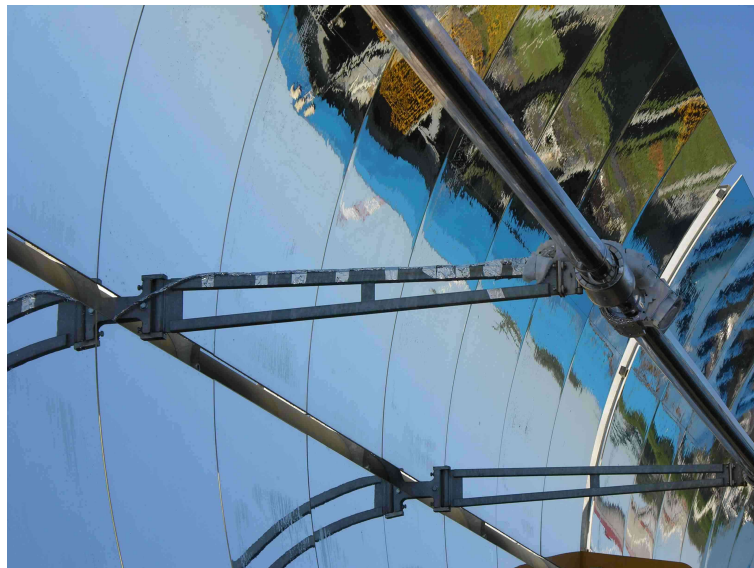


Fig. 4.10: collare-Parretta sul collettore B di PCS nella misura del 28 Ottobre 2005. Nella foto il collettore è rivolto a NORD; il collare è posto a OVEST del braccetto di sostegno.

La Fig. 4.11 mostra la radiazione efficace registrata in PCS; l'andamento estremamente regolare attesta l'assenza di passaggio di corpi nuvolosi. Il collettore B è entrato in inseguimento a partire dalle 8:43 e ne è uscito alle 16:23.

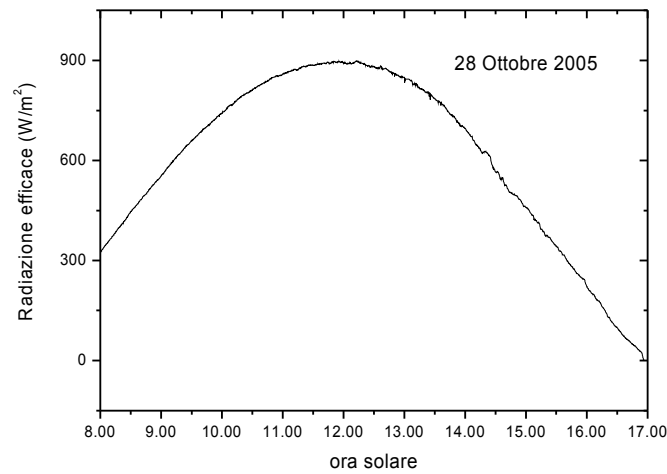


Fig. 4.11: radiazione efficace registrata in PCS nella giornata del 28 Ottobre 2005.

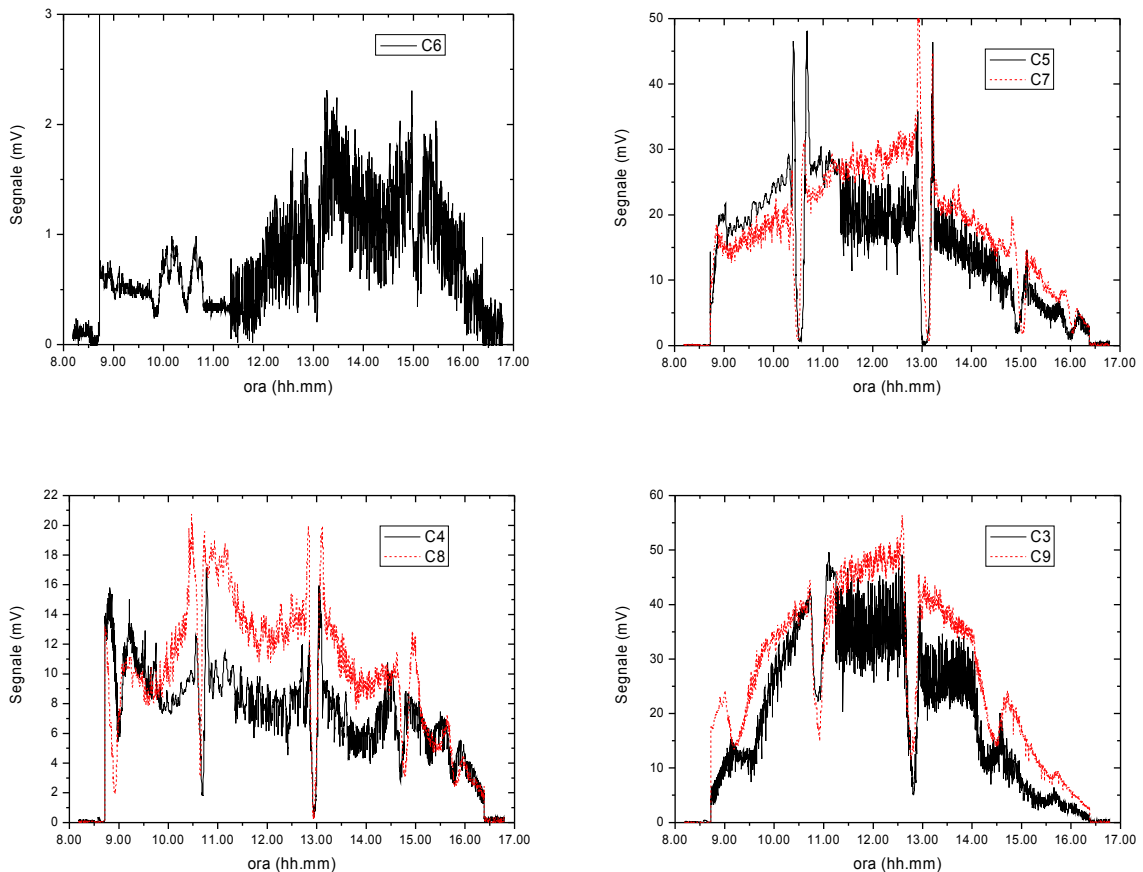


Fig. 4.12: evoluzione temporale del segnale delle fotocelle C6, C5&7, C4&8 e C3&9.

Le Figg. 4.12 mostrano l'evoluzione temporale dei segnali forniti dalle fotocelle più centrali. Il rumore dei segnali aumenta leggermente a partire dalle 11:21; simultaneamente, a partire da quel momento, il segnale delle termocoppie assume valori insensati. Proba-

bilmente tale malfunzionamento è stato causato da un urto accidentale del cavo o dell'unità di registrazione da parte degli operatori impegnati nella misura su campo.

La fotocella centrale (C6) è rimasta sostanzialmente in ombra per tutta la giornata; passato mezzogiorno, quando il braccetto di sostegno del tubo ricevitore adiacente al collare (verso EST) non è più in grado di fare ombra, il segnale mostra un lieve incremento.

Le coppie di fotocelle simmetriche rispetto a quella centrale mostrano andamenti simili, anche se con livelli di segnale differenti. In tutti i casi si osservano delle brusche riduzioni di segnale in prossimità degli orari riportati in Tab. 4.1. In particolare la riduzione del segnale è avvenuta in 5 tornate tra le 8:43 e le 16:07, ad intervalli compresi tra $\frac{1}{2}$ h e poco più di 1 h (vedi ultima colonna di Tab. 4.1). Ogni volta la diminuzione di segnale è avvenuta in modo sfasato tra le diverse celle, anche se con un andamento regolare.

Tab. 4.1: orario corrispondente ai minimi del segnale delle tre coppie di fotocelle più prossime al centro.

C3	C4	C5	C7	C8	C9	$T_{\min}-T_{\max}$
9:33	9:01	9:03	9:09	8:55	9:11	8:43-9:41
10:53	10:42	10:33	10:30	10:39	10:55	10:21-11:05
12:49	12:56	13:04	13:08	12:56	12:48	12:34-13:15
14:18	14:42	14:56	14:56	14:47	14:16	14:04-15:06
15:29	15:45	15:58	15:58	15:48	15:37	15:38-16:07

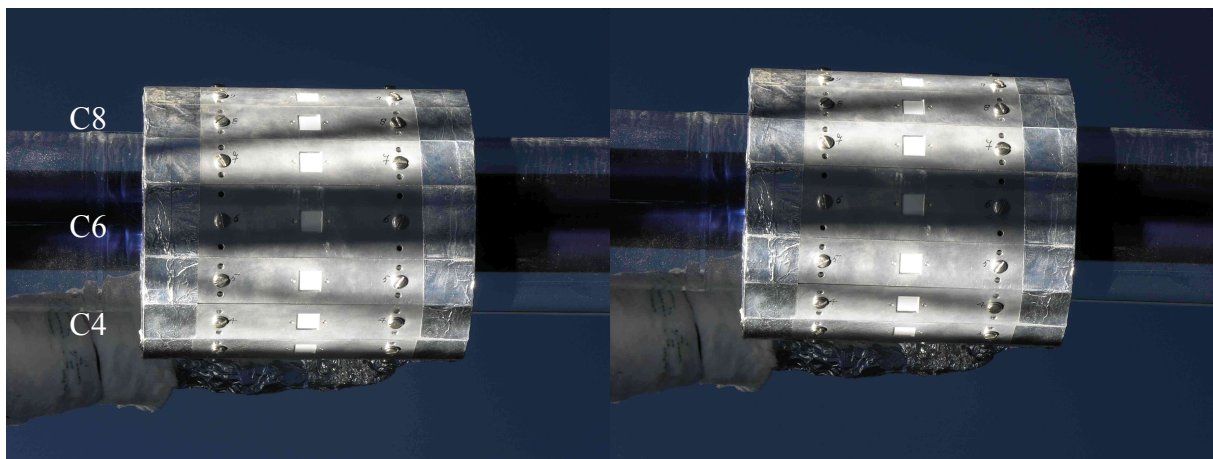


Fig. 4.13: collare visto dal vertice della parabola alle 8:52 (sinistra) e 9:00 (destra). In questo intervallo di tempo l'ombra superiore ha quasi attraversato la fotocella C8.

La diminuzione del segnale va senz'altro attribuita alla riduzione della radiazione concentrata sulle celle; riduzione concomitante al valico della zona di giunzione tra pannelli contigui. Questa ipotesi è comprovata dalle due fotografie scattate rispettivamente alle 8:52 e 9:00 attraverso la zona di separazione tra pannelli al vertice della parabola, larga circa 10 cm (Fig. 4:13). Una seconda prova è offerta dal calcolo del cammino percorso dalla

zona dello specchio che invia la radiazione sul collare; approssimativamente, in prossimità del vertice

$$\Delta L = f [\tan \theta_2 - \tan \theta_1]$$

con θ angolo di incidenza. Considerando il valore medio dei tempi di oscuramento delle celle contigue a quella centrale (C5 e C7), come mostrato in Tab. 4.2, il percorso tra un oscuramento e il successivo è prossimo al valore della larghezza dei pannelli, pari a 120 cm.

Tab. 4.2: cammino percorso in prossimità del vertice dalla zona che riflette la radiazione sul collare.

Orario medio	θ_{inc} (deg)	ΔL (cm)
9:06	-44.94	101
10:31:30	-23.85	149
13:06	20.85	132
14:56	47.97	117
15:58	60.33	

Passiamo ora all'analisi della forma della distribuzione del flusso. In Tab. 4.3 sono riportati gli intervalli temporali in cui nessun segnale è affetto da una riduzione apparente dell'irraggiamento. La tabella riporta inoltre l'orario intermedio e i relativi valori dell'angolo d'incidenza, della radiazione efficace e del fattore di normalizzazione $I_{11:50} / I_h$, utilizzato per normalizzare le distribuzioni di flusso misurate con il collare.

Tab. 4.3: intervalli temporali in cui nessun segnale è affetto da riduzioni apparenti, orario intermedio, angolo d'incidenza, radiazione efficace e fattore di normalizzazione.

$h_{min} h_{max}$	h	θ_{inc} (deg)	I (W/m ²)	N
9:41 – 10:21	10:00	-32.0	744	1.20
11:05 – 12:34	11:50	-1.1	894	1.00
13:15 – 14:04	13:45	31.4	740	1.21
15:06 – 15:38	15:20	53.0	376	2.38
16:07 – 16:23	16:15	63.5	161	5.55

La Fig. 4.14 confronta la vista del collare dal vertice della parabola con la distribuzione di flusso, entrambi registrati alle ore 10:00. In particolare, nel grafico sono riportati i valori medi le deviazioni standard calcolate su un intervallo di ± 5 minuti attorno all'orario intermedio.

La forma della distribuzione del flusso è simile a quanto già osservato nella misura del 10 Agosto 2005, con uno spiccato minimo centrale e due minimi simmetrici in corri-

spondenza delle celle C3 e C7 ($\pm 43^\circ$). La vista del collare conferma pienamente il risultato sperimentale ed inoltre evidenzia un leggero decentramento dell'ombra centrale, pari a 6.3 mm, interpretabile come un offset dal puntamento ottimale di 1.7 mrad. In realtà questo fenomeno è dovuto all'imperfetto allineamento del collare, eseguito con il collettore a 90° nominali. Infatti, empiricamente si è osservato che l'efficienza dell'impianto PCS migliora aggiungendo un offset di 0.1° all'angolo di puntamento, cioè proprio 1.7 mrad. La leggera asimmetria delle misure di distribuzione di flusso osservata con il collare dovrebbe quindi essere dovuta all'imperfetta orientazione del collare stesso.

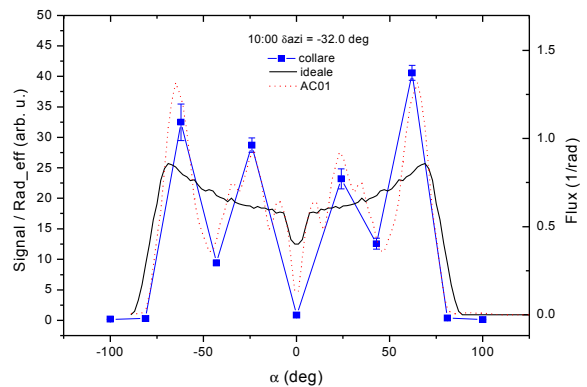
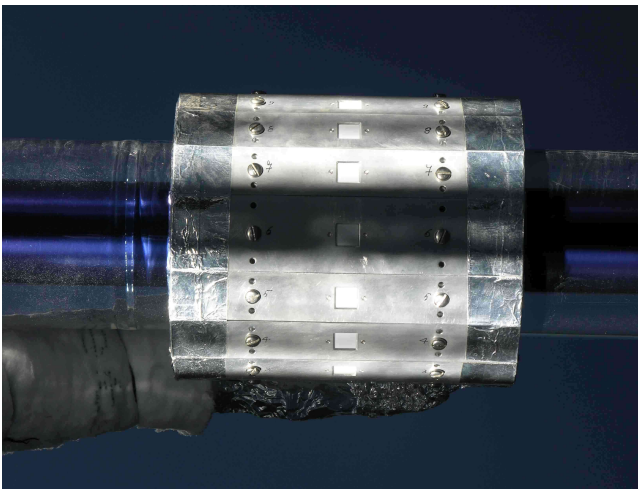


Fig. 4.14: vista del collare dal vertice della parabola e distribuzione di flusso registrata alle 10:00.

In Fig. 4.14 la distribuzione sperimentale è confrontata con le previsioni ottenute considerando un riflettore parabolico ideale ed uno realistico avente il profilo del pannello AC01. Analogamente le Figg. 4.15 mostrano le distribuzioni di flusso registrate in corrispondenza dei rimanenti orari intermedi riportati in Tab. 4.3.

I valori sperimentali non sono mai in accordo con la distribuzione di flusso prevista per una parabola ideale. Invece, come già osservato in precedenza per le misure del 10 Agosto 2005, si osserva un discreto accordo con le previsioni ottenute sulla base delle misure profilometriche del pannello AC01. Più precisamente, l'accordo è migliore quando l'angolo di incidenza della radiazione solare non supera i 50° . Oltre, viene dapprima meno l'accordo nella regione $\alpha < 0$ (15:20), per poi deteriorarsi anche nella restante regione. Probabilmente la dipendenza della risposta delle fotocelle dall'angolo di incidenza ha un ruolo importante in questo fenomeno. Per giungere a conclusioni più certe si dovrebbe disporre della caratterizzazione completa della risposta delle fotocelle, disponibile a breve, e della concomitante immagine del collare, al fine di escludere fenomeni di ombreggiamento.

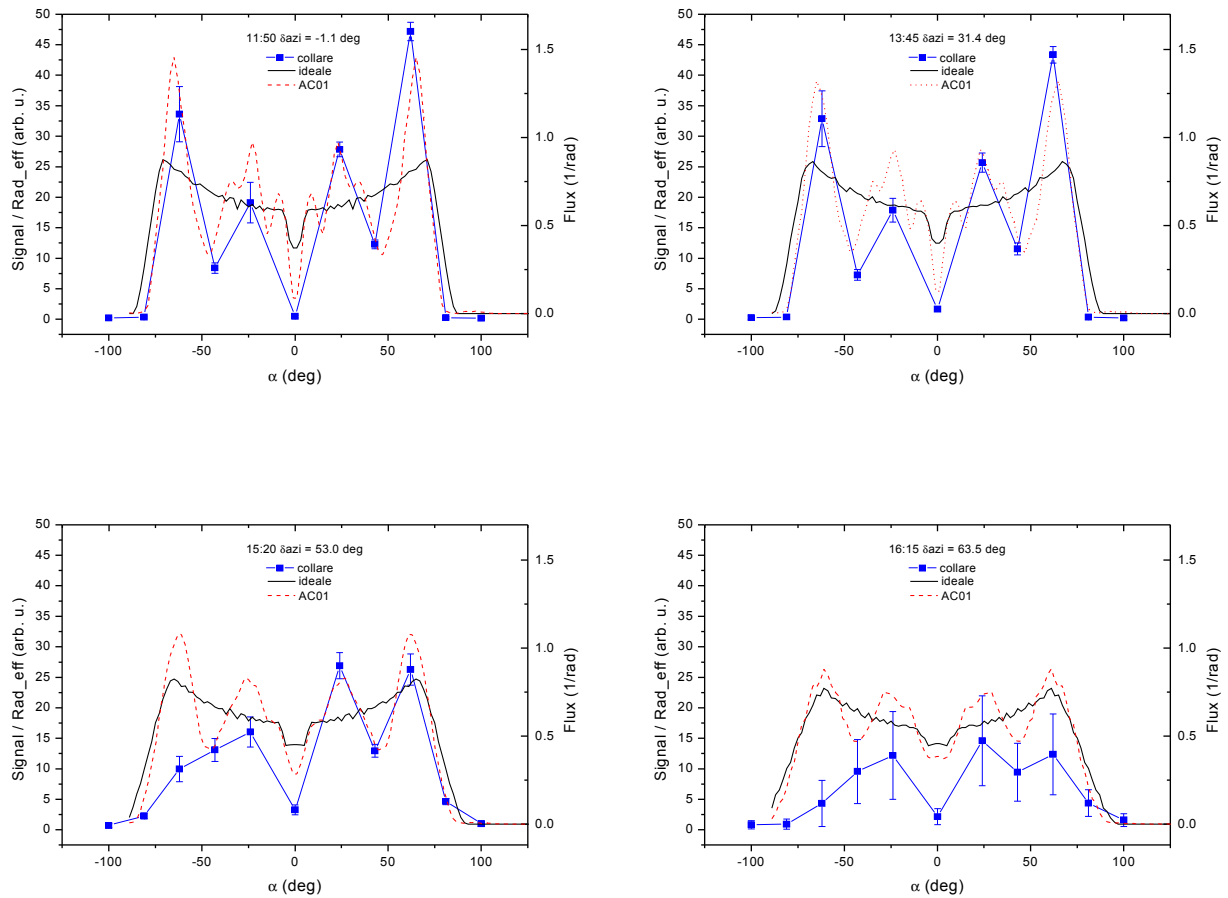


Fig. 4.15: distribuzioni di flusso registrate alle 11:50, 13:45, 15:20 e 16:15.

5. Discussione e conclusioni

La validità della tecnica del collare per la misura della distribuzione del flusso di radiazione è notevolmente limitata dall'impossibilità a risalire all'effettiva distribuzione del flusso sulla superficie del ricevitore. Inoltre, a meno di utilizzare una fenditura infinitesima, non v'è certezza che la radiazione rilevata dal collare possa essere integralmente intercettata dal ricevitore. Nel Parascan-II, sviluppato presso il DLR, questo problema è risolto introducendo una serie di rivelatori anche sulla faccia interna del collare per misurare la radiazione non catturata dal ricevitore[1].

Nonostante questi limiti, lo sviluppo dei due prototipi di collare ha consentito di eseguire interessanti misure su PCS.

Il collare Mittiga-Gentilin è stato propedeutico al secondo prototipo, il collare-Parretta, grazie al fatto che è utilizzato lo stesso modello di cella fotovoltaica, la HECO252 prodotta dalla SunPower. Con le misure di Luglio-Agosto-Settembre 2004 si è stabilito che questa fotocella è in grado di misurare i flussi di radiazioni presenti in PCS, resiste anche a temperature superiori al valore dichiarato dal produttore e che il degrado dopo due mesi di utilizzo su campo è sufficientemente contenuto.

Le misure eseguite nel 2005, con il collare-Parretta hanno fornito informazioni più accurate sulla forma della distribuzione del flusso. Più precisamente, la forma osservata differisce notevolmente da quanto previsto per un concentratore parabolico ideale; invece è in ottimo accordo con la previsione basata sui dati sperimentali del profilometro ottico disponibili per due campioni (AC01 e AC02) appartenenti alla medesima fornitura di pannelli prodotti dalla Arcacompositi utilizzata alla data della misura nel collettore B di PCS.

Più precisamente la forma a doppio corno della distribuzione di flusso è dovuta alla forma a “ ω ” della deviazione del profilo del pannello. Inoltre, dalle simulazioni effettuate è risultato che la prevalenza dei picchi posizionati a $\pm 65^\circ$ rispetto a quelli presenti a $\pm 23^\circ$, osservata a bassi angoli di incidenza, è indipendente dall’andamento mediamente crescente della deviazione del profilo (vedi Fig. 4.5); tale andamento è accompagnato da un valore positivo della media della deviazione dell’arcotangente (vedi Fig. 4.6), pari a 0.52 mrad per AC01. Infatti, imponendo una rotazione del pannello tale da rendere nulla la media delle deviazioni dell’arcotangente e ripetendo il calcolo, si ottiene una distribuzione di flusso sostanzialmente coincidente alla precedente.

L'accordo è discreto ad angoli di incidenza della radiazione solare non superiori a 50° . Oltre, viene dapprima meno l'accordo nella regione $\alpha < 0$, per poi degradarsi anche nella restante regione. Probabilmente la dipendenza della risposta delle fotocelle dall'angolo di incidenza ha un ruolo importante in questo fenomeno. Per giungere a conclusioni più certe si dovrebbe disporre della caratterizzazione completa della risposta delle fotocelle, disponibile a breve, e della concomitante immagine del collare, al fine di escludere fenomeni di ombreggiamento. Questo punto sarà dunque chiarito in una prossima campagna di misura.

Considerata la notevole utilità della ripresa del collare dal vertice della parabola, nella prossima campagna di misure sarà opportuno prevedere l'installazione di una videocamera azionabile da remoto.

Infine, le prove su campo hanno permesso di stabilire che la temperatura raggiunta dalle fotocelle nel collare-Parretta è più contenuta rispetto al caso del collare Mittiga-Gentilin. D'altra parte il secondo prototipo vanta un migliore isolamento termico ed è dotato di ventola per la dissipazione del calore.

Bibliografia

[1] K. J. Riffelmann, A. Neumann, M. Wittkowski, “Parascan: a new parabolic trough flux scanner”, ISES Solar World Congress 2003, ISBN 91-631-4740-8, Göteborg, June 2003.