

## Concentrazione fv



# IL RADIOMETRO

Dopo aver illustrato, nello scorso numero, la teoria delle sfere integratrici, vediamo ora come quei concetti sono stati tradotti in pratica con la realizzazione, presso il centro Enea di Portici, di un prototipo di dispositivo *Double-cavity radiometer* per la misura del fascio solare in concentratori *point-focus*. La rassegna prosegue sulla prossima uscita, dove verrà analizzato un radiometro Disr.

■ **ANTONIO PARRETTA** – Enea, Università di Ferrara, **NICOLÒ BARONI** – Università di Ferrara

Per risolvere i problemi dei precedenti radiometri a singola cavità per alte densità di flusso luminoso, è stato avviato il progetto di sviluppo di una nuova tipologia di radiometri a doppia cavità integrante, dei quali il Dcr (*Double-cavity radiometer*) è il primo prototipo [1,2]. Questo strumento si basa sull'uso di fotorivelatori convenzionali del tipo termico o fotovoltaico ai quali la radiazione perviene dopo aver subito un processo di integrazione spaziale e di attenuazione controllata all'interno di due cavità utilizzate come sfere integratrici [3]. Le cavità integranti sono costituite da sfere integratrici comunicanti tra loro attraverso aperture regolabili, oppure da cavità scavate all'interno di un blocco di metallo, o di un altro materiale facilmente lavorabile, anch'esse comunicanti tra loro attraverso aperture regolabili. Dal punto di vista ottico la loro funzione è la stessa. Il numero di cavità attraverso

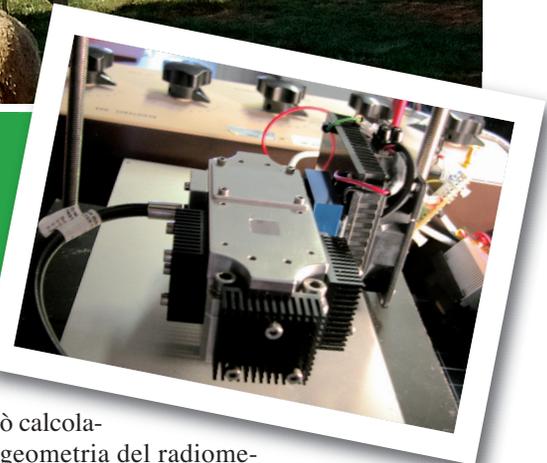
le quali la radiazione viene integrata e successivamente attenuata può anche essere superiore a due, a seconda del grado di attenuazione della radiazione che si vuole raggiungere. La prima cavità seleziona la porzione del fascio da misurare, integra la radiazione al suo interno, ne seleziona ulteriormente una parte, attraverso un'apertura posta tra le due cavità e praticata su un inserto rimovibile, e la trasferisce alla seconda cavità. Nella seconda cavità la luce viene ulteriormente integrata e perviene ai rivelatori previsti per la misura dell'intensità della radiazione. I rivelatori di flusso sono tipicamente del tipo a fotodiode o rivelatore piroelettrico e sono affacciati direttamente all'interno della seconda cavità; sono presenti poi ulteriori porte di uscita per altri eventuali strumenti, quali una fibra ottica con la funzione di collegare la seconda cavità a uno spettrometro o spettroradiometro.



Installazione di sistemi Cpv di Concentrix presso il centro Isfoc di Puertollano, in Spagna.

# DCR

Il radiometro Dcr durante un test con un simulatore solare eseguito presso l'Enea di Portici.



## CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

Lo schema di principio del Dcr è mostrato in **Figura 1**.

Il radiometro si compone di una testa di misura, che contiene i sensori di radiazione e di temperatura, e di una serie di strumenti a essa collegati per la misura delle grandezze radiometriche, spettrali e termiche. La testa di misura è stata realizzata a partire da un prisma di alluminio sezionato e scavato per ricavare al suo interno le cavità emisferiche e le aperture verso l'esterno (vedi **Figura 2** a pag. 42).

Nella **Figura 1** si individuano le parti essenziali del radiometro: (*ra*) la testa di misura, (*si1*) la prima cavità, (*si2*) la seconda cavità, (*fr1*) un primo fotorivelatore (fotovoltaico), (*fr2*) un secondo fotorivelatore opzionale (pireolettrico), (*fo*) la fibra ottica, (*fco*) la porta di comunicazione tra le due cavità, (*fin*) la finestra d'ingresso per la radiazione, (*rad1*) il primo radiometro fotovoltaico a bassa intensità (multimetro), (*rad2*) il secondo radiometro pireolettrico a bassa intensità, (*sp*) lo spettrometro.

Il funzionamento del radiometro è il seguente: il fascio concentrato di radiazione incide dall'alto sulla finestra d'ingresso (*fin*) della prima cavità (*si1*); il fascio è integrato all'interno di (*si1*) grazie alle particolari caratteristiche diffuse della parete rivestita di un coating di BaSO<sub>4</sub>; grazie a questa integrazione l'irradianza sulle pareti e sulle finestre di (*si1*) è resa omogenea; parte della radiazione da (*si1*) è trasferita tramite la finestra (*fco*) alla seconda cavità (*si2*) di dimensioni uguali a (*si1*); la seconda cavità integra ulteriormente la radiazione che, infine, irraggia le finestre presenti al suo interno. La radiazione risulterà anche attenuata, perché il suo passaggio da (*si1*) a (*si2*) com-

porta un'attenuazione che si può calcolare conoscendo la geometria del radiometro, le proprietà riflettive delle sue pareti e di tutti i componenti presenti. I fotorivelatori (*fr1*) e (*fr2*), collegati ai rispettivi moduli (*rad1*) e (*rad2*), costituiscono un sistema di misura radiometrico a bassa intensità; il collegamento della fibra ottica (*fo*) con lo spettrometro (*sp*) permette la misura della distribuzione spettrale dell'intensità radiante all'interno di (*si2*). Questa distribuzione, in condizioni di risposta piatta della riflettanza delle pareti del radiometro, corrisponderà alla distri-

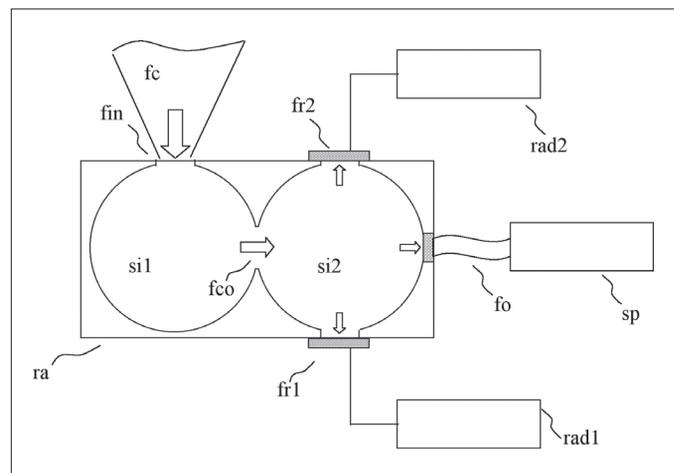


Figura 1. Schema del principio del radiometro Dcr.

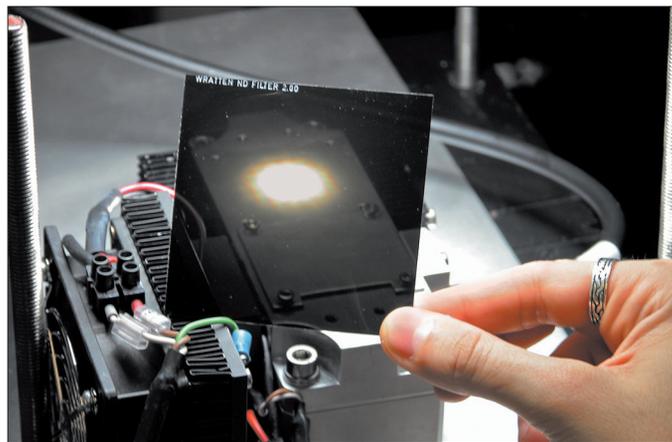
## Concentrazione fv



**Figura 2.** Spaccato del radiometro durante la sua costruzione da parte dell'azienda Ecovide [5], prima della ricopertura delle pareti interne con il rivestimento diffusivo di BaSO<sub>4</sub>.

buzione dello spettro della radiazione all'ingresso del radiometro, in caso contrario, essa risulterà alterata a seconda delle proprietà riflettenti del rivestimento

Oltre agli elementi essenziali illustrati nella **Figura 1**, all'interno del Dcr sono presenti palette o schermi (*baffles*) che servono a ridurre le interferenze tra i vari componenti affacciati all'interno delle sfere integratrici e a impedire che la radiazione in ingresso non integrata pervenga direttamente agli strumenti (*vedi Figura 2*). Inoltre, la porta di separazione tra le due cavità non è fissa, ma è realizzata attraverso una serie di inserti provvisti di un'apertura circolare di diametro variabile, che vengono inseriti uno alla volta tra le due cavità in un'apposita fenditura, determinando un valore particolare per il fattore di attenuazione  $f_A$  (*vedi Figura 2*). Infine, la testa di misura, in corrispondenza della prima cavità, è esternamente circondata da una serie di radiatori alettati con lo scopo di smaltire il calore prodotto al suo interno per effetto della non perfetta riflettività delle pareti. Un

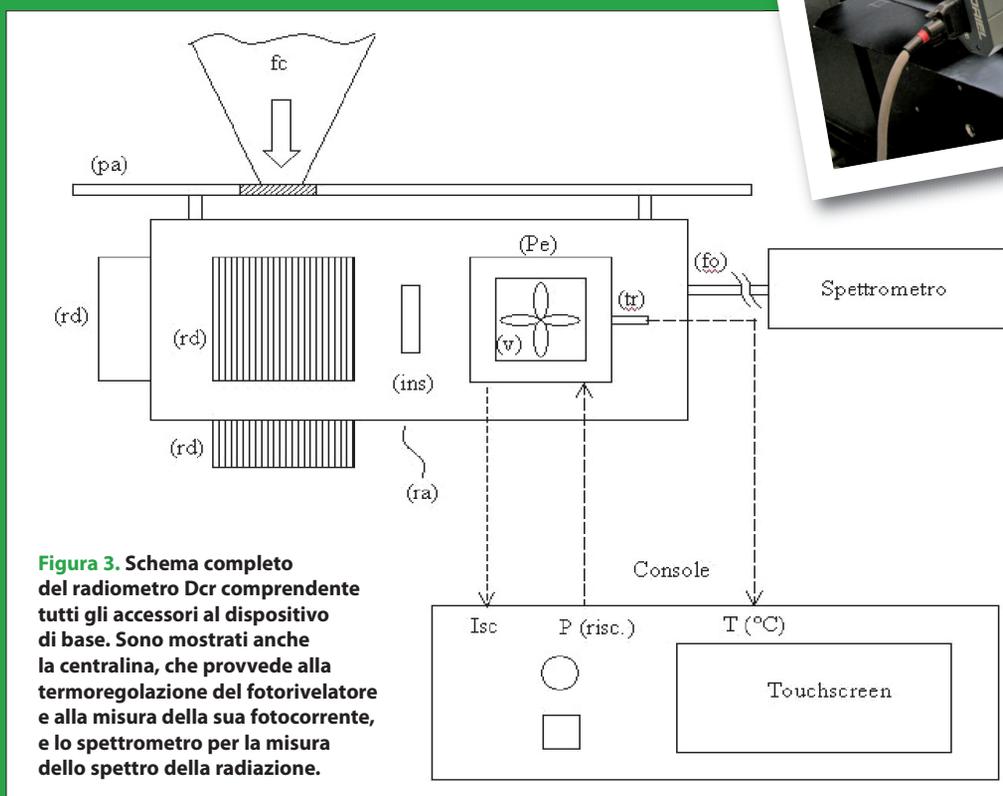


**Figura 4.** Il dispositivo *Double-cavity radiometer* durante un test con un simulatore solare eseguito presso il centro sperimentale Enea di Portici.

ulteriore miglioramento del radiometro Dcr consiste nella termoregolazione del fotorivelatore ( $f_r I$ ), la cella al silicio SunPower HECO252, il quale, per effetto della variazione discreta del fattore di attenuazione determinato dall'inserto usato, è soggetta a un irraggiamento non costante durante le misure e ciò determina una variazione della sua temperatura che altera il valore misurato della fotocorrente, e quindi



Il radiometro Dcr durante un test.





della potenza incidente calcolata a partire da essa; per assicurare una maggiore stabilità e precisione di misura, pertanto, è stato necessario realizzare un sistema di termoregolazione del fotorivelatore con un sistema Peltier. Il fotorivelatore piroelettrico, seppur previsto, non è stato installato sul prototipo Dcr. Lo schema completo del radiometro è mostrato in **Figura 3**, mentre la **Figura 4** mostra il dispositivo durante i test effettuati presso l'Enea di Portici con un fascio concentrato prodotto da un simulatore solare.

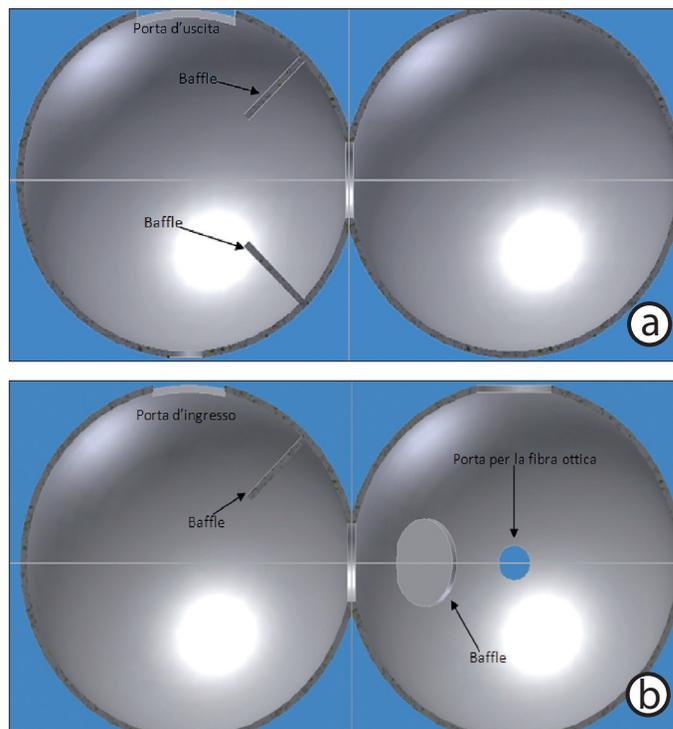
### MODELLIZZAZIONE OTTICA

Il radiometro è stato modellato per mezzo di un programma Cad mantenendo le dimensioni e il numero di porte del prototipo Dcr [4]: diametro delle sfere di 5 cm; porta d'ingresso quadrata di area  $1,21\text{cm}^2$  ( $1,1 \times 1,1$  cm); porta del fotorivelatore quadrata di area  $2,25\text{cm}^2$  ( $1,5 \times 1,5$  cm); porta per la fibra ottica circolare di area  $0,196\text{cm}^2$ ; apertura tra le due sfere di area variabile da  $0,1$  a  $2\text{cm}^2$ ; baffles circolari di diametro 12 mm. In **Figura 5** è mostrato il modello ottico delle due sfere creato col programma Cad.

Il modello ottico del Dcr è stato impostato assegnando una riflettanza  $R_s$  di tipo lambertiano e variabile da 92% a 99% per le pareti delle sfere e per le palette (*baffles*) e una riflettanza del 4% per la fibra ottica; sulla finestra di uscita di (*fr1*) è stato posto un assorbitore perfetto. Per studiare le proprietà ottiche del modello, quest'ultimo è stato esportato verso un programma di simulazione ottica (TracePro). Il programma realizza la tracciatura dei raggi (*raytracing*) del modello una volta che sia stato impostato il fascio al suo ingresso, ovvero la sua geometria e il numero di raggi; successivamente, viene analizzato il flusso in corrispondenza delle superfici di interesse, ad esempio la superficie della parete e quella della porta di uscita dove è posto il fotorivelatore.

#### → Analisi del flusso all'interno del Dcr

Le due sfere, per lavorare da buoni dispositivi integranti, devono avere una distribuzione abbastanza omogenea del flusso sul-

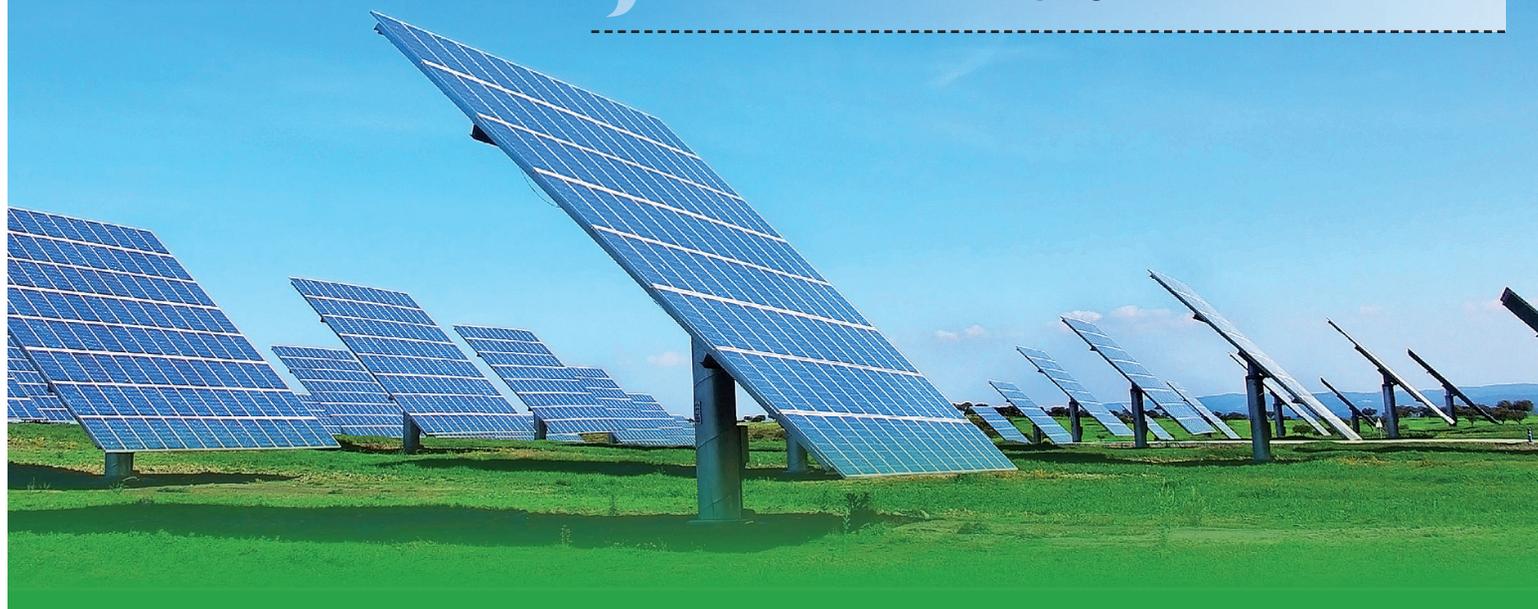


**Figura 5.** Modello ottico del Dcr: in alto, la sezione orizzontale (a); in basso, la sezione verticale (b).

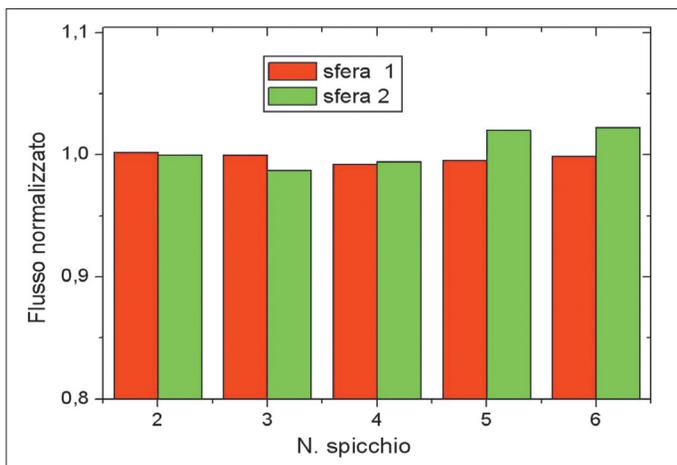
le loro pareti; ciò è stato verificato attraverso le prime simulazioni fatte impostando una porta intermedia (*fco*) con area di  $1\text{cm}^2$  e una riflettanza di parete del 95% (valore medio della riflettanza sperimentale misurata per il prototipo). Per fare ciò la parete interna di ciascuna sfera è stata divisa in sei spicchi; ogni spicchio è una superficie ideale senza spessore, cui non si applicano proprietà ottiche superficiali, e che ha la funzione di monitorare il flusso che l'attraversa senza interagire con esso. Una volta completata la simulazione, si prende la mappa d'irradianza dello spicchio e se ne rileva il flusso dei rag-



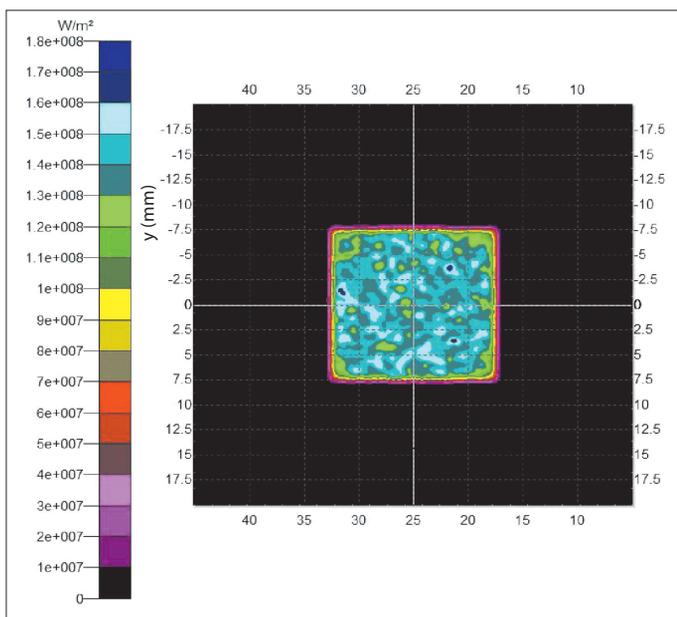
Per studiare le proprietà ottiche del modello è stato utilizzato un programma di simulazione



# Concentrazione fv



**Figura 6.** Flusso normalizzato incidente sui diversi spicchi della superficie sferica. Uno dei sei spicchi non è mostrato in quanto contiene la porta di collegamento tra le due sfere e, quindi, non è significativo.



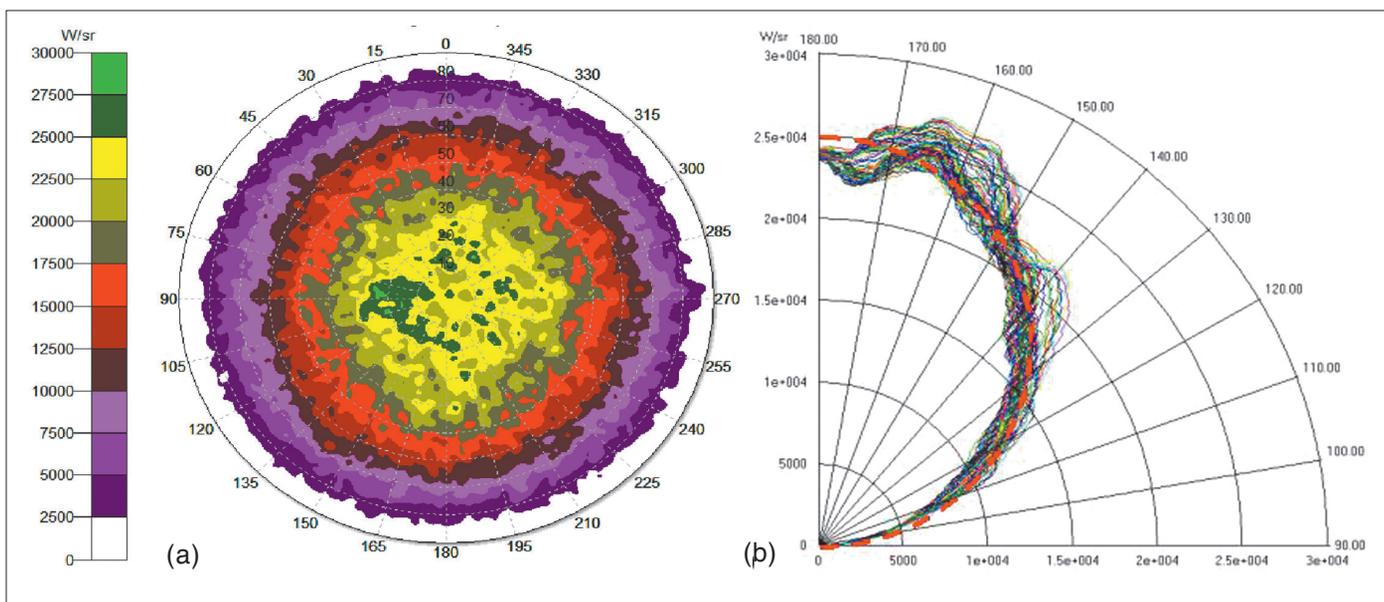
**Figura 7.** Distribuzione del flusso (irradianza in  $W/m^2$ ) misurata sul ricevitore ideale (assorbanza 100%) posto all'uscita del Dcr.

gi incidenti: per la prima sfera si prende come asse di rotazione degli spicchi l'asse verticale passante per il centro della sfera e della finestra d'ingresso, mentre per la seconda sfera si prende come asse di rotazione degli spicchi l'asse orizzontale passante per il centro della sfera e per il centro della finestra d'uscita. Entrambe le simulazioni sono fatte con 100.000 raggi e una potenza d'ingresso di 1 W per singolo raggio. I risultati sono riportati nei grafici della **Figura 6**. Dall'istogramma si vede che il flusso incidente sulle pareti delle due sfere è sufficientemente costante, mantenendosi entro l'1-2%.

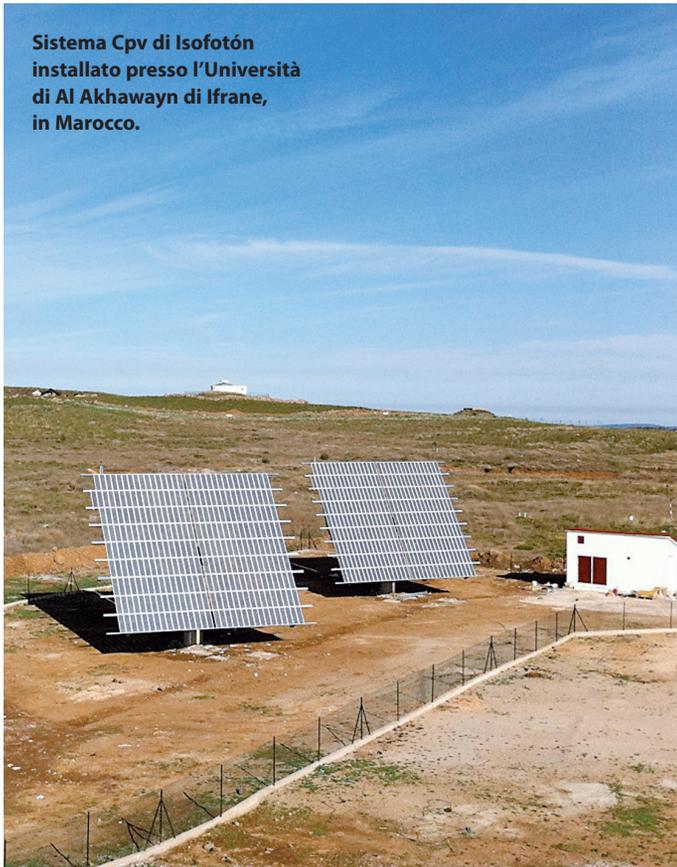
### ➔ Analisi del flusso in uscita

Una volta constatato che le due sfere integrano bene la luce al loro interno, siamo andati a verificare che il flusso in uscita dalla porta (*fr1*) fosse effettivamente uniforme e lambertiano. Per verificare la prima condizione è stato misurato il profilo dell'irradianza sulla finestra di uscita quando questa è chiusa su un assorbitore perfetto. La simulazione è stata fatta impostando ancora una riflettanza di parete del 95% e un'area di  $1\text{ cm}^2$  per la porta di collegamento tra le due sfere, ma è stata aumentata la precisione della simulazione "lanciando" in entrata al Dcr 2 milioni di raggi. La **Figura 7** mostra la mappa d'irradianza sul *target* assorbitore posto all'uscita del radiometro. Come si può notare, la distribuzione del flusso è molto omogenea; questa è una caratteristica molto positiva per il radiometro, dal momento che permette alla cella solare di lavorare nelle migliori condizioni [6].

La simulazione della distribuzione angolare del flusso all'uscita del Dcr è stata effettuata con due milioni di raggi e analizzata attraverso due tipologie di *plot*, o distribuzioni del flusso radiante: la *Polar-Iso candela* (vedi **Figura 8a**) e la *Polar candela distribution* (vedi **Figura 8b**). Per una sorgente lambertiana ci aspettiamo una radianza costante, ovvero un'intensità radiante che vari con l'angolo polare come una funzione coseno. Dalle due distribuzioni della **Figura 8** si vede come questo andamento sia rispettato sufficientemente bene (si veda in particolare il buon accordo tra le curve di **Figura 8b** e l'andamento ideale lambertiano rappresentato da semicerchio rosso). Le piccole imperfezioni che si riscontrano per piccoli angoli polari sono da imputare alla presenza della fibra ottica, allineata sull'asse della finestra di uscita.



**Figura 8.** Distribuzione angolare dell'intensità radiante (in  $W/sr$ ) del flusso in uscita: gli angoli azimutali sono sulla circonferenza, quelli polari sono sul raggio del diagramma circolare (a). In (b), profilo dell'intensità radiante (in  $W/sr$ ) del flusso in uscita in funzione dell'angolo polare per diversi valori dell'angolo azimutale (a ogni curva è associato un angolo azimutale differente). Il semicerchio rosso rappresenta il coseno dell'angolo polare.



**Sistema Cpv di Isotofón  
installato presso l'Università  
di Al Akhawayn di Ifrane,  
in Marocco.**



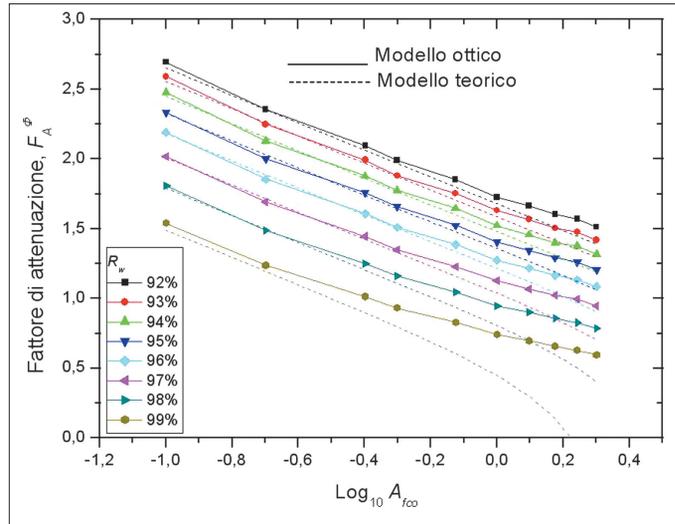
**L'omogenea distribuzione del flusso  
è una caratteristica molto positiva  
perché permette alla cella solare  
di lavorare nelle migliori condizioni**

**→ Studio del fattore di attenuazione**

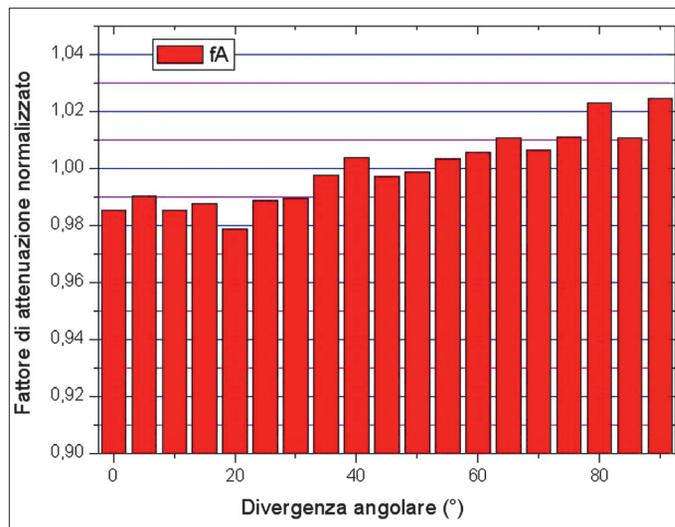
Una volta constatato che il radiometro funziona correttamente, sono state studiate le caratteristiche principali del Dcr, e cioè come varia il fattore di attenuazione in funzione delle dimensioni della porta intermedia tra le due sfere e della riflettanza di parete  $R_w$ , e se i dati acquisiti rispettano i dati teorici ottenuti dall'equazione seguente [3]:

$$f_A^\Phi = \frac{\Phi_m}{\Phi_{out}} = \frac{[1 - (R_w f_{w1} + \sum_{i=1}^{N_i} R_i f_i)] \cdot [1 - (R_w f_{w2} + \sum_{j=1}^{N_j} R_j f_j)] - f_{co}^2 \cdot R_w^2}{f_{out} \cdot f_{co} \cdot R_w^2} \quad (1)$$

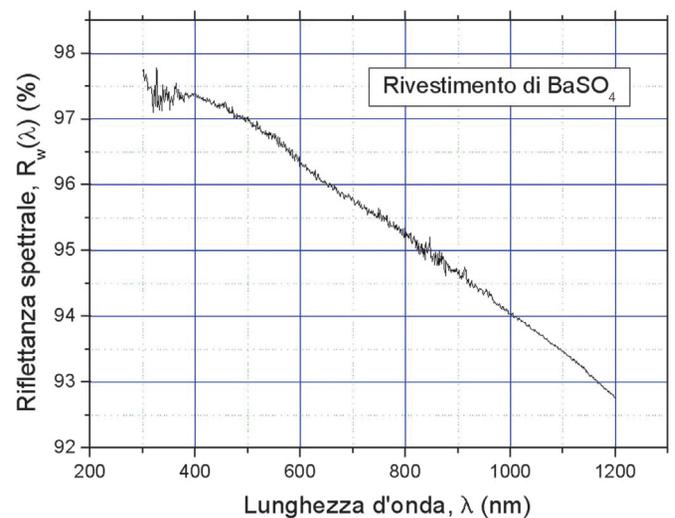
Le simulazioni sono state fatte per porte intermedie di area pari a: 0,1/0,2/0,4/0,5/0,75/1,00/1,25/1,50/1,75/2,00 cm<sup>2</sup> e riflettanze di parete che vanno dal 92% al 99%. I raggi in ingresso al radiometro Dcr sono stati per ogni prova 550.000. I risultati del fattore di attenuazione per il flusso,  $f_A^\Phi$ , sono riportati in **Figura 9** in scala log/log in funzione dell'area della porta intermedia  $A_{fco}$  e per i diversi valori della riflettanza di parete  $R_w$ . Nella stessa figura sono riportati i risultati del modello teorico. Notiamo intanto come  $f_A^\Phi$  diminuisca sia all'aumentare di  $A_{fco}$  che all'aumentare di  $R_w$ , come d'altronde ci aspettavamo. Nel caso teorico la diminuzione di  $f_A^\Phi$  in scala log/log rispetto a  $A_{fco}$  ha un anda- →



**Figura 9.** Dipendenza in scala log/log del fattore di attenuazione  $f_A^\Phi$  in funzione dell'area  $A_{fco}$  della porta intermedia e della riflettanza di parete  $R_w$ .

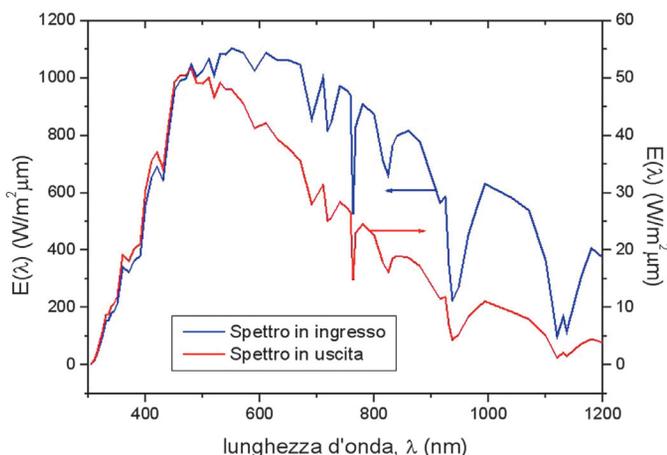


**Figura 10.** Dipendenza del fattore di attenuazione  $f_A^\Phi$  normalizzato dall'angolo di divergenza lineare del fascio in ingresso.

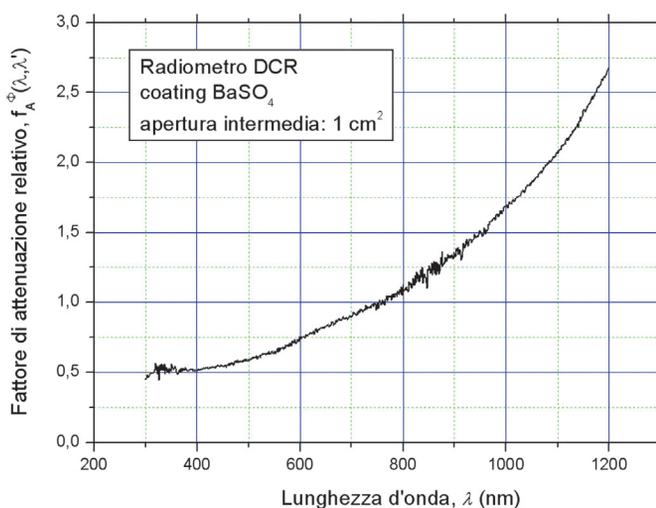


**Figura 11.** Riflettanza spettrale  $R_w(\lambda)$  del coating di BaSO<sub>4</sub> del prototipo di radiometro Dcr. La riflettanza media è pari a 95,5%.

## Concentrazione fv



**Figura 12.** Irradianza spettrale misurata all'ingresso del Dcr confrontata con quella misurata in uscita. A causa della riflettività di parete non costante,  $\bar{R}_w=0,95$ , lo spettro del Sole viene alterato fortemente dalle riflessioni multiple (34).



**Figura 13.** Fattore di attenuazione relativo tra le diverse lunghezze d'onda, calcolato a partire dal modello del Dcr reale (con palette) e per una porta intermedia di 1 cm<sup>2</sup> di area. La lunghezza d'onda di riferimento è  $\lambda' = 750$  nm.

mento quasi lineare, il che concorda bene con quanto stabilito dalla (1), ovvero che  $f_A^\phi$  è approssimativamente inversamente proporzionale a  $f_{co}$ , la frazione di area della porta intermedia, così come è spiegata la diminuzione via via crescente di  $f_A^\phi$  all'aumentare di  $R_w$  dalla dipendenza di  $f_A^\phi$  con l'inverso del quadrato di  $R_w$ . I risultati del modello ottico sono molto simili a quelli teorici fino a valori di  $\log(A_{fco}) \approx -0,3$  ( $A_{fco} = 0,5$  cm<sup>2</sup>), ma si discostano sensibilmente da essi per valori superiori. La spiegazione è data dall'approssimazione che il modello teorico fa, non considerando la presenza delle palette (è praticamente impossibile tenere conto di esse nelle equazioni), in particolare quelle poste nella seconda sfera, le quali contribuiscono a bloccare il passaggio del flusso dando un valore di  $f_A^\phi$  più alto, tanto più quanto più grande è la porta intermedia (vedi Figura 9).

Notiamo come  $f_A^\phi$  vari di almeno due ordini di grandezza, il che significa che, se il concentratore solare lavora con fattori di concentrazione al di sotto di 100-500 soli, sul fotorivelatore potremo mantenere sempre un livello di irraggiamento non superiore a pochi soli. Naturalmente il controllo del fattore di attenuazione va fatto regolando l'apertura intermedia del radiometro (non la riflettività di parete, che rimane una costan-

te dello strumento), e questa può essere ridotta anche al di sotto di quanto riportato nel grafico di Figura 9 ( $A_{fco} = 0,1$  cm<sup>2</sup>), potendo così estendere il range dinamico del Dcr a tre decenni.

### → Come la divergenza angolare del fascio influenza il fattore di attenuazione

Un radiometro universale deve fornire un risultato indipendente dalla divergenza angolare del fascio, a parità di flusso incidente. Per verificare questa condizione per il Dcr abbiamo effettuato simulazioni con flusso in entrata costante (numero costante di raggi in ingresso e stessa potenza per ogni raggio), ma con divergenza angolare lineare variabile da 0° a 90°. Il risultato è l'istogramma riportato in Figura 10 (vedi a pag. 45) che mostra la dipendenza del fattore di attenuazione normalizzato dalla divergenza angolare. Ciò che si ottiene è una variazione percentuale massima del fattore di attenuazione pari al 4-5%, una variazione troppo alta per gli standard richiesti dal nostro obiettivo, cioè, avere un radiometro universale che possa essere utilizzato per luce concentrata con diverse divergenze angolari, ovvero su concentratori di diversa geometria del fascio. Nel prossimo numero di *PV Technology* vedremo come questa dipendenza verrà ridotta sensibilmente adottando una geometria diversa per il radiometro.

### → Come lo spettro della luce concentrata viene influenzato dal Dcr

L'ultima indagine fatta sul Dcr è stata verificare come lo strumento influenzi lo spettro della radiazione in ingresso al dispositivo e, quindi, che tipo di spettro si abbia all'uscita sul fotorivelatore. In effetti lo spettro viene alterato per il fatto che la parete interna delle sfere riflette in maniera diversa le diverse lunghezze d'onda, ovvero ha una riflettanza spettrale non costante,  $R_w = R_w(\lambda)$ . Di conseguenza il fattore di attenuazione sarà diverso alle diverse lunghezze d'onda:  $f_A^\phi = f_A^\phi(\lambda)$ . Per ottenere  $f_A^\phi(\lambda)$ , abbiamo dapprima misurato la riflettanza spettrale  $R_w(\lambda)$  del coating di BaSO<sub>4</sub> del prototipo Dcr, che è riportata in Figura 11 (vedi a pag. 45).

Per conoscere  $f_A^\phi(\lambda)$ , a parità di area dell'apertura intermedia  $A_{fco}$ , è necessario conoscere il numero medio di riflessioni,  $\bar{N}$ , che la luce subisce all'interno del Dcr prima di raggiungere l'uscita. È importante notare che il parametro  $\bar{N}$  dipende dalla geometria del radiometro, in particolare dalla scelta dell'area della porta intermedia, e quindi cambia al variare di quest'ultima. Questo parametro si ottiene facilmente lanciando due simulazioni con due diversi valori di  $R_w$ , e quindi ricavando i corrispondenti flussi in uscita. Avremo infatti:

$$\Phi_{out}(R_w) = \Phi_{out}(R_w = 1) \cdot R_w^{\bar{N}} \quad (2)$$

$$\Phi_{out}(R'_w) = \Phi_{out}(R'_w = 1) \cdot R'^{\bar{N}} \quad (2')$$

$$\frac{\Phi_{out}(R_w)}{\Phi_{out}(R'_w)} = \left[ \frac{R_w}{R'_w} \right]^{\bar{N}} \quad (3)$$

$$\bar{N} = \frac{\log \left[ \frac{\Phi_{out}(R_w)}{\Phi_{out}(R'_w)} \right]}{\log \left[ \frac{R_w}{R'_w} \right]} \quad (4)$$



Il prototipo si è dimostrato un valido strumento, ma occorre migliorarne le proprietà riflettive

CONCENTRIX SOLAR

L'equazione (2) si spiega dicendo che, se le pareti non danno perdite ottiche,  $R_w = 1$ , il flusso perso è solo quello che esce dalle sfere.

In presenza di perdita sulle pareti,  $R_w < 1$ , il flusso che raggiunge l'uscita sarà ridotto di un fattore ulteriore pari a  $R_w^N$ . Una volta noto  $N$ , che nel caso del Dcr reale vale 34 quando l'area della porta intermedia è fissata a  $1\text{ cm}^2$ , il fattore di attenuazione  $f_A^\Phi(\lambda)$  sarà dato da:

$$f_A^\Phi(\lambda) = \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}[R(\lambda)]} = \frac{\Phi_{in}}{\Phi_{out}(1) \cdot [R(\lambda)]^N} \quad (5)$$

A partire dall'equazione (5) possiamo vedere come viene alterato lo spettro della componente diretta del Sole, quella che viene sfruttata nei concentratori solari, all'interno del Dcr reale. La **Figura 12** mostra a confronto lo spettro solare in ingresso e in uscita dal radiometro.

L'effetto che il radiometro Dcr ha sullo spettro in ingresso può essere riassunto dalla grandezza  $f_A^\Phi(\lambda, \lambda')$ , definita dal rapporto tra i fattori di attenuazione a due diverse lunghezze d'onda.

$$f_A^\Phi(\lambda, \lambda') = \frac{f_A^\Phi(\lambda)}{f_A^\Phi(\lambda')} = \left[ \frac{[R(\lambda')]}{[R(\lambda)]} \right]^N \quad (6)$$

L'equazione (6) definisce il fattore di attenuazione relativo tra due diverse lunghezze d'onda. Esso è riportato in **Figura 13** per il Dcr reale e un'apertura intermedia di  $1\text{ cm}^2$ . Le lunghezze d'onda più alte, cui corrispondono riflettività più basse, avendo fissato  $\lambda' = 750\text{ nm}$  la lunghezza d'onda corrispondente al valore medio della riflettanza (vedi **Figura 11**), daranno luogo ad un fattore di attenuazione più alto. Se si cambia il coating di  $\text{BaSO}_4$  con un altro migliore, ad esempio lo Zenith® della Sphere Optics, che ha riflettività media di parete del 99% su tutto lo spettro di nostro interesse, lo spettro di uscita sarà solo lievemente alterato, come vedremo nel prossimo numero della rivista.

## CONCLUSIONI

In conclusione, abbiamo analizzato in grande dettaglio il radiometro a doppia cavità Dcr per misure di fasci solari concentrati 3-D, di cui esiste un prototipo presso l'Enea di Portici, per il quale abbiamo presentato le sue caratteristiche costruttive e il suo modello ottico completo. Il radiometro Dcr è risultato uno strumento valido, ma dovrà essere migliorato riducendo la sua dipendenza dalla divergenza angolare del fascio in ingresso, soprattutto migliorando le proprietà riflettive della superficie interna, che producono una forte alterazione dello spettro solare in ingresso. Sul prossimo numero della rivista discuteremo un altro radiometro, sempre a doppia cavità, che rappresenta un sensibile avanzamento tecnologico rispetto a quello presentato. ■

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Parretta, C. Privato, A. Maccari e G. Nenna, *Dispositivo a sfere integratrici per l'attenuazione di radiazioni*. Brevetto It., Applicazione N. BO2004A000798, del 23 Dicembre 2004.
- [2] A. Parretta, A. Antonini, M. Armani, G. Nenna, G. Flaminio, M. Pellegrino, *Double-Cavity Radiometer for High Flux Density Solar Radiation Measurements*, *Applied Optics*, **46**, 2166-2179 (2007).
- [3] A. Parretta, N. Baroni, *Radiometri per sistemi Cpv, Parte I*, *PV Technology*, n. 1, 34-39 (2011).
- [4] N. Baroni, *Modellazione ottica di due flussometri per radiazione solare concentrata: DCR e DISR*, Tesi di Laurea, Università di Ferrara, A.A. 2009-2010.
- [5] [www.ecovide.com](http://www.ecovide.com)
- [6] D. Vincenzi, M. Stefancich, S. Baricordi, C. Malagù, M. Pasquini, F. Gualdi, G. Martinelli, A. Parretta, A. Antonini, *Effects of irradiance distribution unevenness on the ohmic losses of point-focus and dense-array CPV systems*, in Proc. of the 24<sup>th</sup> EPSEC, Hamburg, Germany, 21-25 September 2009.