

Il radiometro Disr

Dopo aver trattato, negli ultimi due numeri di PV Technology, la teoria delle sfere integratrici e illustrato la loro applicazione in un radiometro Dcr, concludiamo la rassegna delle soluzioni per la misura di flussi solari concentrati con l'analisi di un dispositivo *Double integrating sphere radiometer*.



ANTONIO PARRETTA
Enea, Università di Ferrara

NICOLÒ BARONI
Università di Ferrara

MAURIZIO ARMANI
Solar Total Italia,

EMILIANO MILAN
Facon Electronica

Il progetto del Disr (*Double integrating sphere radiometer*) nasce con l'intento di superare alcuni limiti mostrati dal radiometro Dcr (*Double-cavity radiometer*): una risposta troppo dipendente dalla divergenza angolare del fascio in ingresso e una marcata alterazione dello spettro della radiazione incidente in corrispondenza del fotorivelatore.

Il sensore, o testa di misura, del radiometro Disr (nel seguito il termine Disr sarà usato sia per indicare il sensore sia l'apparato radiometrico nel suo complesso) è composto come il Dcr [1] da due cavità sferiche integratrici ricavate per lavorazione meccanica di un prisma di alluminio [2]. Le due cavità sono successivamente rivestite con un materiale diffusivo che presenta una riflettività molto elevata ($\approx 99\%$) nell'intervallo spettrale di nostro interesse (300 - 1.200 nm), nonché proprietà di stabilità termica e meccanica fino a $\approx 350^\circ\text{C}$. La **Figura 1a** mostra una vista prospettica del sensore (1), così come appare nel brevetto [3], mentre la **Figura 1b** e la **Figura 1c** mostrano le sezioni rispettivamente della vista laterale e della pianta.

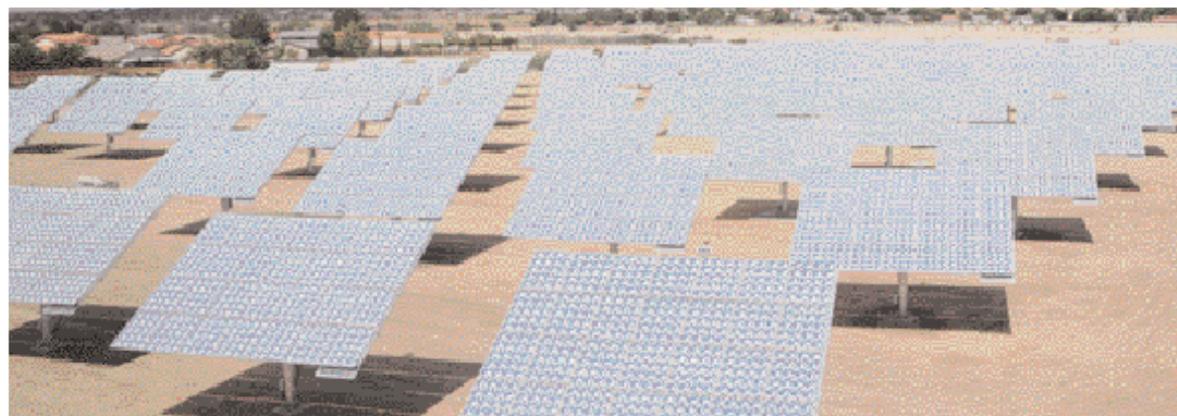
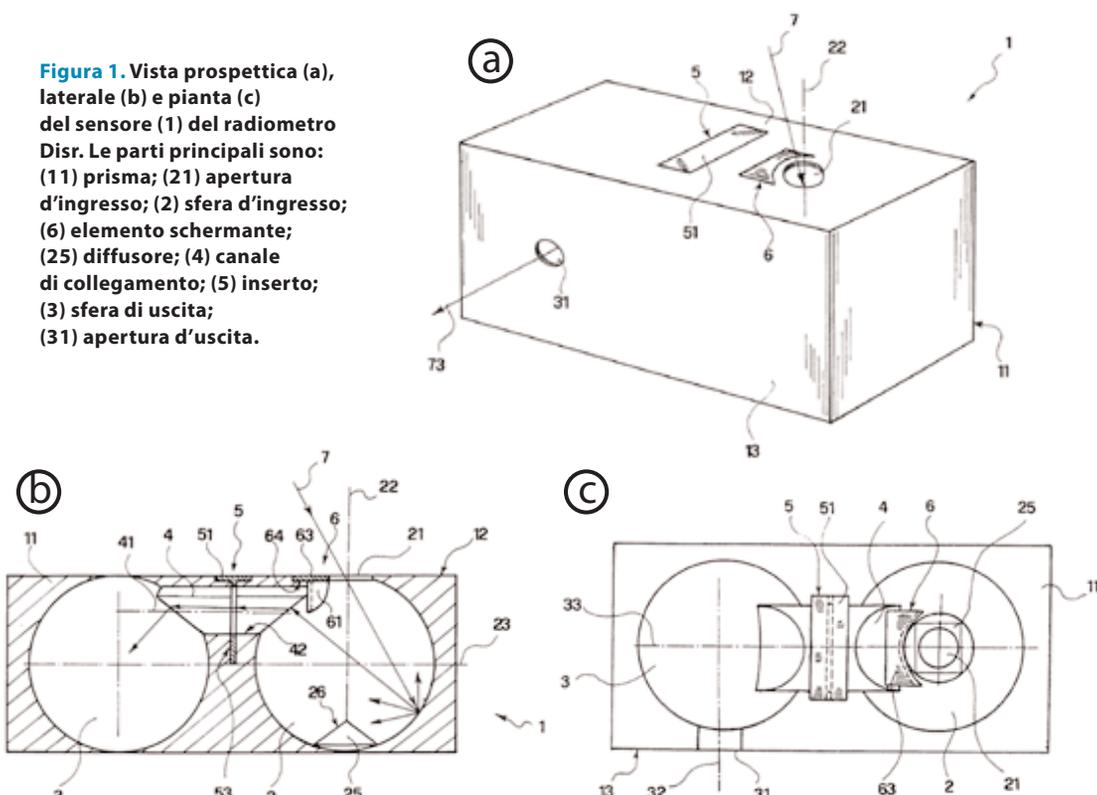


Figura 1. Vista prospettica (a), laterale (b) e pianta (c) del sensore (1) del radiometro Disr. Le parti principali sono: (11) prisma; (21) apertura d'ingresso; (2) sfera d'ingresso; (6) elemento schermante; (25) diffusore; (4) canale di collegamento; (5) inserto; (3) sfera di uscita; (31) apertura d'uscita.



CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

Dalla **Figura 1** si nota intanto che, a differenza del Dcr, le due cavità integranti non si intersecano più, ma rimangono separate, essendo connesse otticamente dal canale di comunicazione (4). Lo scopo di questa modifica è di poter controllare con maggiore precisione il flusso trasmesso dalla prima (2) alla seconda sfera (3). Come si può osservare nella **Figura 1b**, la prima cavità (2) del Disr presenta degli elementi di novità importanti. Innanzitutto manca lo schermo (*baffle*) che nel Dcr impediva la trasmissione diretta della radiazione dall'apertura d'ingresso (21) alla seconda cavità.

L'azione del *baffle* è ora in parte svolta dall'elemento schermante (6) e in parte dal canale di comunicazione (4). L'inconveniente principale del *baffle* nel Dcr era che la riflessione di tipo lambertiano che la radiazione d'ingresso subiva sulla sua superficie determinava una perdita ottica non trascurabile (la radiazione veniva riflessa fuori dall'apertura d'ingresso), che diventava sempre più importante all'aumentare della divergen-

za angolare del fascio. La conseguenza era che la risposta del radiometro, ovvero il suo fattore di attenuazione, cambiava sensibilmente con la divergenza angolare del fascio, a parità di flusso (in *W*) in ingresso.

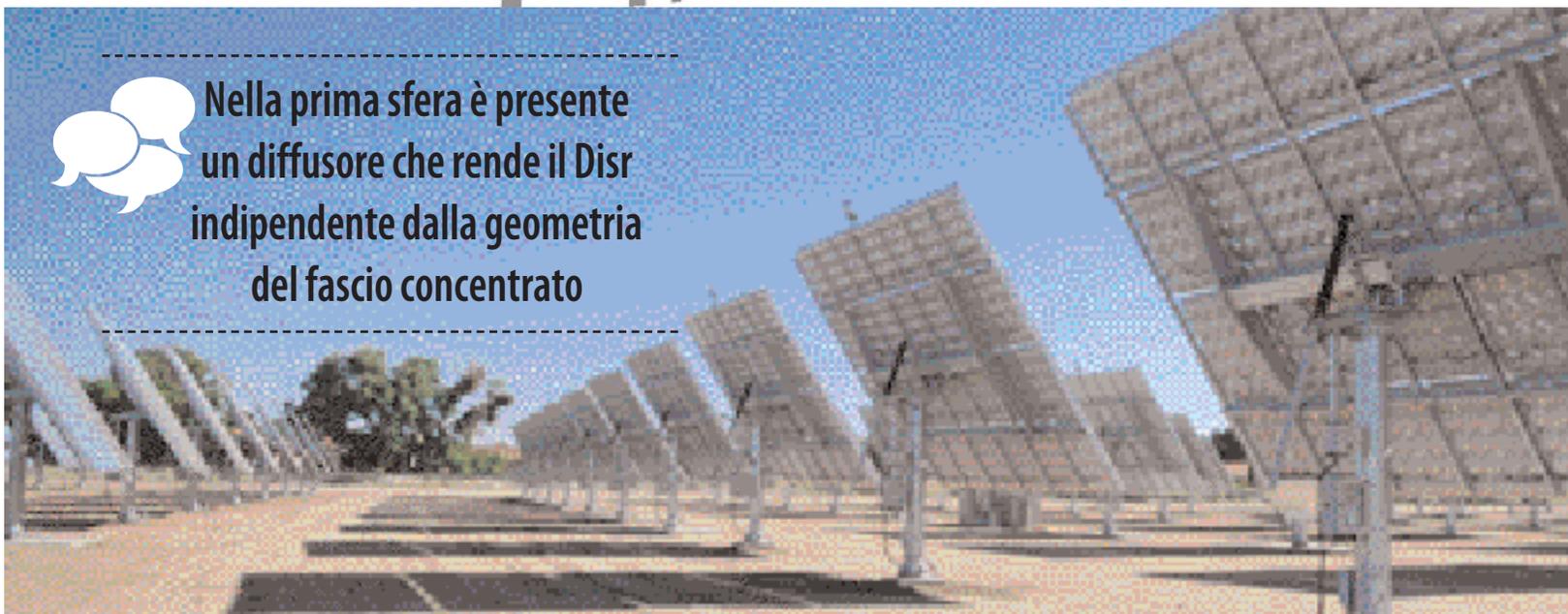
Nel Disr il *baffle* è stato sostituito da un elemento schermante (6) posto in corrispondenza dell'apertura d'ingresso (21) e caratterizzato da una superficie (61) di forma cilindrica rivestita, nella parte che si affaccia sulla (21), di un *coating* metallico speculare (vedi **Figura 2a** a pag. 00), e nella parte che si affaccia all'interno della sfera di un *coating* diffusivo uguale a quello della parete.

L'elemento (6) è disposto in modo da impedire al fascio in ingresso l'accesso diretto al canale (4); inoltre, la porzione di fascio che intercetta l'elemento (6) è riflesso specularmente verso l'interno della cavità, con una trascurabile perdita ottica, tra l'altro indipendente dall'angolo d'incidenza, escludendo in tal modo qualsiasi riflessione all'indietro come avveniva per il *baffle* del Dcr. Per tutte le altre direzioni d'incidenza, il fascio (7) →

Concentrazione fv



Nella prima sfera è presente un diffusore che rende il Disr indipendente dalla geometria del fascio concentrato



Impianto Cpv realizzato con moduli SolFocus.

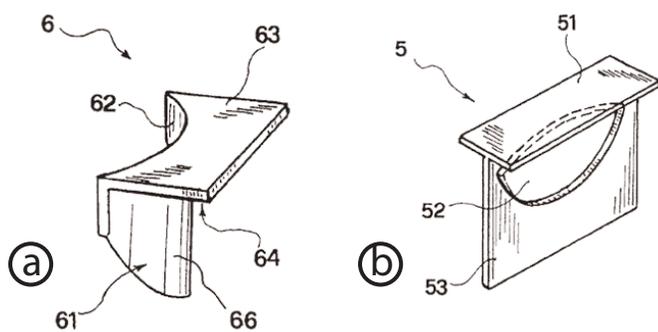


Figura 2. In (a), vista prospettica dell'elemento schermante (6), formato da una superficie cilindrica concava speculare (62) e da una superficie cilindrica convessa diffusiva (66). In (b), vista prospettica dell'inserto rimovibile (5), caratterizzato dall'apertura (52).

colpisce direttamente la parete interna della prima cavità (2) e pertanto, in virtù delle proprietà lambertiane di quest'ultima, viene riflesso in modo sostanzialmente omogeneo in tutte le direzioni. Con questa innovazione sul componente (6) si riduce fortemente la dipendenza della risposta del Disr dalla divergenza angolare del fascio, come verrà dimostrato dalla modellazione ottica che segue.

La seconda innovazione apportata con il nuovo radiometro è la presenza nella prima sfera (2), in posizione opposta rispetto all'apertura (21), dell'elemento diffusore (25) di forma conica (vedi **Figura 1b** a pag. 00). La funzione di questo elemento è di disperdere angolarmente la porzione di fascio incidente che entra nella sfera (2) con un angolo d'incidenza molto basso, quasi parallelo all'asse verticale (22). Riducendo fortemente la riflessione del fascio all'indietro verso l'apertura d'ingresso (21), anche questo elemento (25) contribuisce a rendere il radiometro insensibile alla geometria del fascio concentrato incidente.

Il canale di comunicazione (4) tra le due sfere è stato intenzionalmente posizionato al di sopra dell'asse X che congiunge i centri delle due sfere, e al suo interno la luce continua a subire riflessioni prima di passare dalla prima (2) alla seconda (3) sfera. All'interno del canale (4), e nella sua parte mediana, la luce incontra l'inserto (5), che ha funzioni di diaframma, un elemento rimovibile montato sul corpo

principale (11) e caratterizzato da un'apertura (52) attraverso la quale passa la luce (vedi **Figura 2b**). Il radiometro Disr è dotato di una serie di inserti (5) caratterizzati da valori diversi per l'area dell'apertura (52). La sostituzione di un inserto con un altro ha lo scopo di variare il fattore di attenuazione del radiometro, ovvero di mantenere il flusso trasmesso alla sfera di uscita (3) pressoché costante al variare del flusso in ingresso alla sfera (2).

COME FUNZIONA

A causa delle molteplici riflessioni diffuse del fascio entrante (7) sulla superficie interna, la condizione raggiunta all'interno della prima cavità (2) è tale che tutti i punti della superficie si comportino come sorgenti uniformi di radiazione elettromagnetica con uguale intensità; la radiazione incidente (7) subisce quindi una prima attenuazione e omogeneizzazione all'interno della prima cavità (2).

La forma allungata del canale (4), la sua particolare disposizione in prossimità della parete (12) e la presenza dell'elemento schermante (6) consentono di ridurre al minimo, o azzerare, la porzione di radiazione che riesce a imboccare il canale (4) stesso dopo poche riflessioni o direttamente dall'apertura di ingresso (21). Pertanto la porzione di radiazione che imbocca il canale (4) proviene sostanzialmente da queste sorgenti uniformi e quindi la sua intensità dipende dall'intensità del fascio incidente (7) in base ai soli parametri geometrici del dispositivo (1), essendo indipendente dall'angolo di incidenza e dall'apertura angolare del fascio (7).

L'elemento regolatore (5), a sua volta, lascia che solo una porzione di tale radiazione possa passare alla seconda cavità (3), in relazione alle dimensioni dell'apertura (52), che è diversa per i diversi elementi regolatori (5). La radiazione che giunge nella seconda cavità (3) subisce analoghe riflessioni multiple sulla superficie della stessa e quindi la condizione raggiunta all'interno è anche qui quella in cui tutti i punti della superficie si comportano come sorgenti uniformi di radiazione elettromagnetica con uguale intensità radiante. La seconda cavità (3), identica a quella del Dcr, attua quindi un'ulteriore attenuazione e omogeneizzazione della radiazione, una porzione (73) della quale esce dall'apertura di uscita (31) e va a uno strumento di misura.

L'apertura di uscita (31) è regolabile in funzione delle carat-

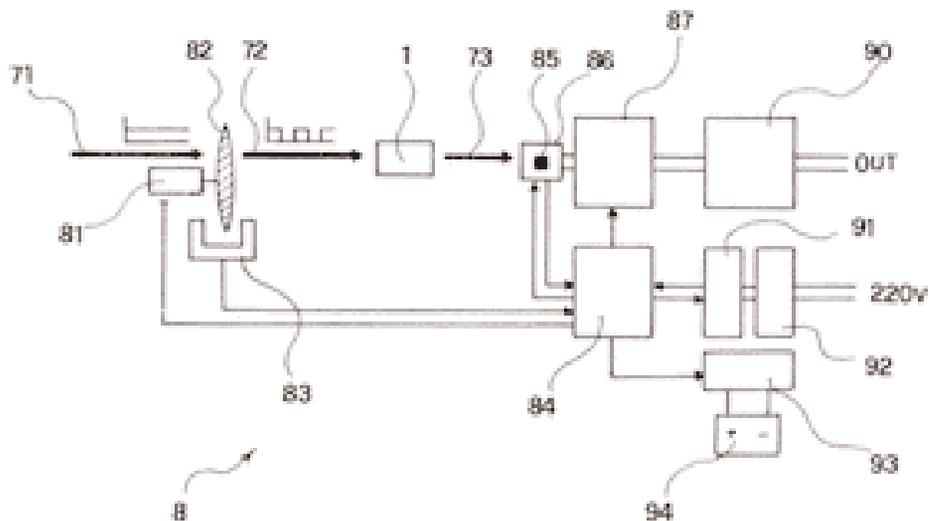
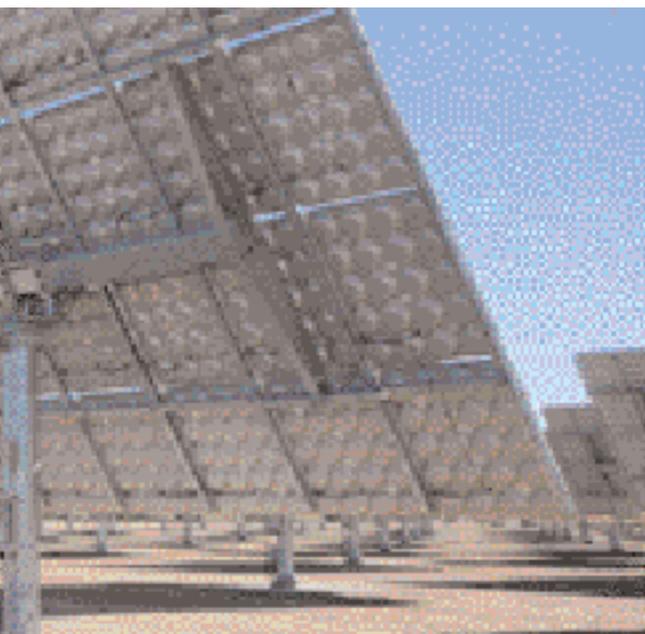


Figura 3. Schema dell'apparato completo del radiometro Disr (8) comprendente il sensore (1) e la centralina di controllo.

teristiche tecniche dello strumento utilizzato. Grazie ai particolari accorgimenti adottati, il fattore di attenuazione del Disr dipende solo dalle sue caratteristiche geometriche e non dalle caratteristiche della radiazione incidente; il fattore di attenuazione può essere modificato solo sostituendo il regolatore (5).

Tale fattore di attenuazione viene determinato nel corso della taratura del dispositivo (1) ed è successivamente utilizzato per l'elaborazione delle misure. Le caratteristiche di uniformità del fattore di attenuazione in funzione dell'apertura angolare del fascio incidente rendono il dispositivo (1) adatto all'analisi dell'intensità di un fascio concentrato generato da un qualsiasi dispositivo ottico a concentrazione.

Le cavità (2) e (3), nonché il canale (4) potrebbero anche essere ricavate per lavorazione meccanica all'interno di un corpo (11) realizzato in materiale avente già di per sé le proprietà ottiche riflettenti e diffondenti richieste. In questo caso la fase di rivestimento delle cavità stesse sarebbe superflua, pur potendo comportare un aumento dei costi per il materiale.

Per il radiometro Disr è stata prevista una diversa centralina di controllo (vedi **Figura 3**), che differisce da quella del Dcr per il fatto che la luce concentrata è modulata meccanicamente prima di essere misurata. In tal modo è possibile misurare il flusso in uscita dalla seconda sfera con grande precisione.

L'apparato radiometrico (8) comprende un *chopper* (82) che modula meccanicamente il fascio concentrato (71) in ingresso all'apparato radiometrico (8). L'esatta frequenza della modulazione viene misurata attraverso la coppia led-fototransistor (83), il cui segnale viene letto dall'unità di controllo (84) che alimenta il motore (81) mantenendo la frequenza fissata al valore impostato. L'unità di controllo (84) è realizzata mediante un microcontrollore corredato da un'interfaccia di controllo seriale per la programmazione di tutti i parametri dell'apparato radiometrico (8).

Il fascio concentrato modulato (72) è inviato all'apertura di ingresso (21) del dispositivo di attenuazione (1), dal quale esce il fascio attenuato (73). La misura del fascio attenuato (73) avviene mediante il sensore (85), ovvero una cella a concentrazione calibrata o un fototransistor, il sistema termostatico (86) e la rete di pilotaggio (87). Il sistema termostatico (86) comprende una cella a effetto Peltier, una ventola di raffreddamento e una termocoppia per la misura della temperatura del sensore (85).

Il sensore (85) è fatto funzionare correttamente e in modo otti-

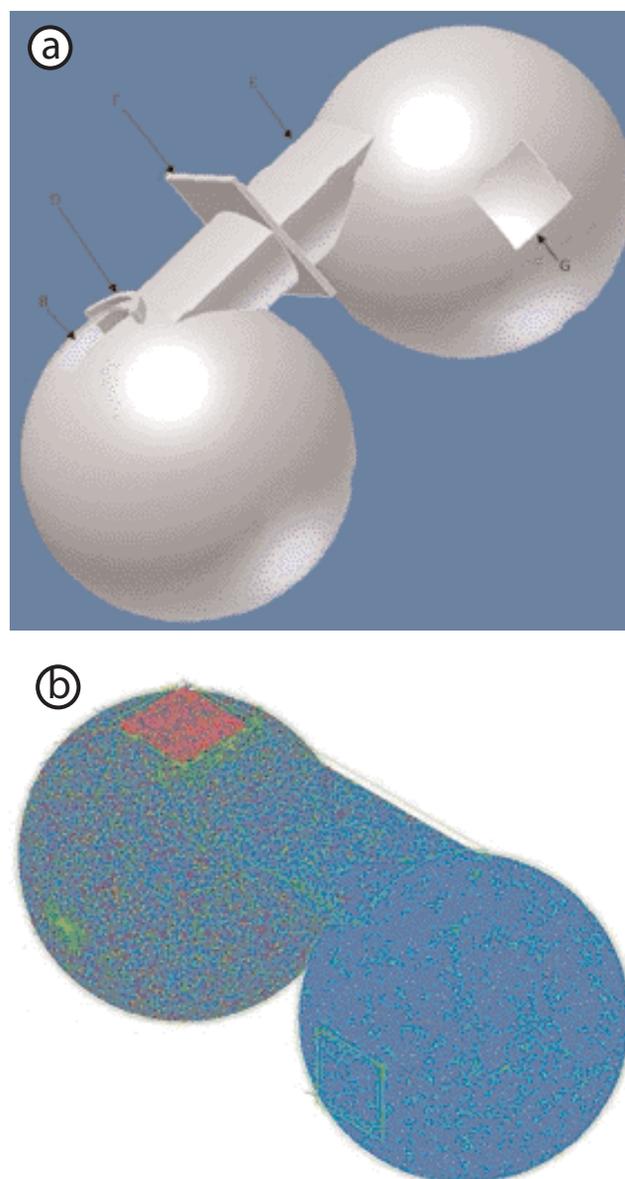


Figura 4. Vista esterna del modello ottico del sensore Disr (a). In basso, esempio di raytracing (b).

Concentrazione fv

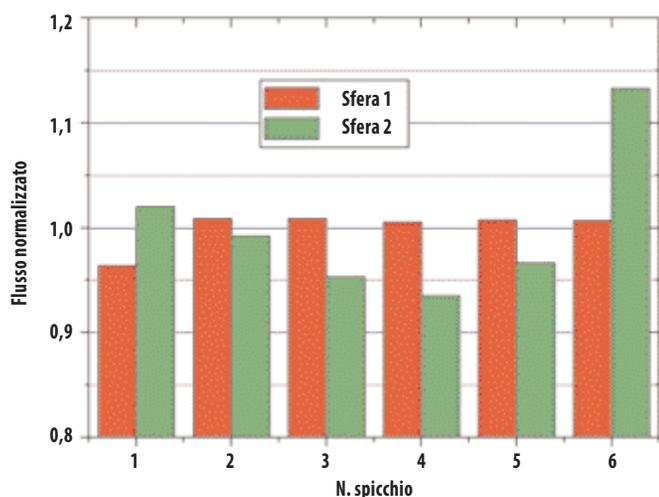


Figura 5. Flusso normalizzato incidente sui diversi spicchi delle due cavità.

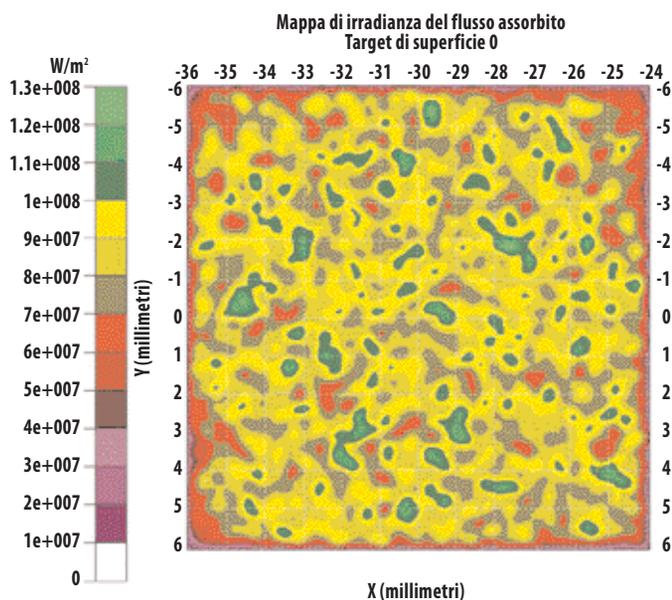


Figura 6. Distribuzione spaziale del flusso (W/m^2) misurata sul ricevitore ideale posto all'uscita del Disr.

male dalla rete di pilotaggio (87). Il controllo del sensore avviene in corrente, in quanto la caratteristica intensità luminosa-corrente è molto lineare per un ampio intervallo di correnti ed è meno sensibile alla temperatura rispetto alla caratteristica intensità luminosa-tensione. La rete di pilotaggio (87) del sensore (85) effettua anche una polarizzazione inversa del sensore stesso, al fine di aumentare la linearità di lettura del fototransistor o della cella a concentrazione.

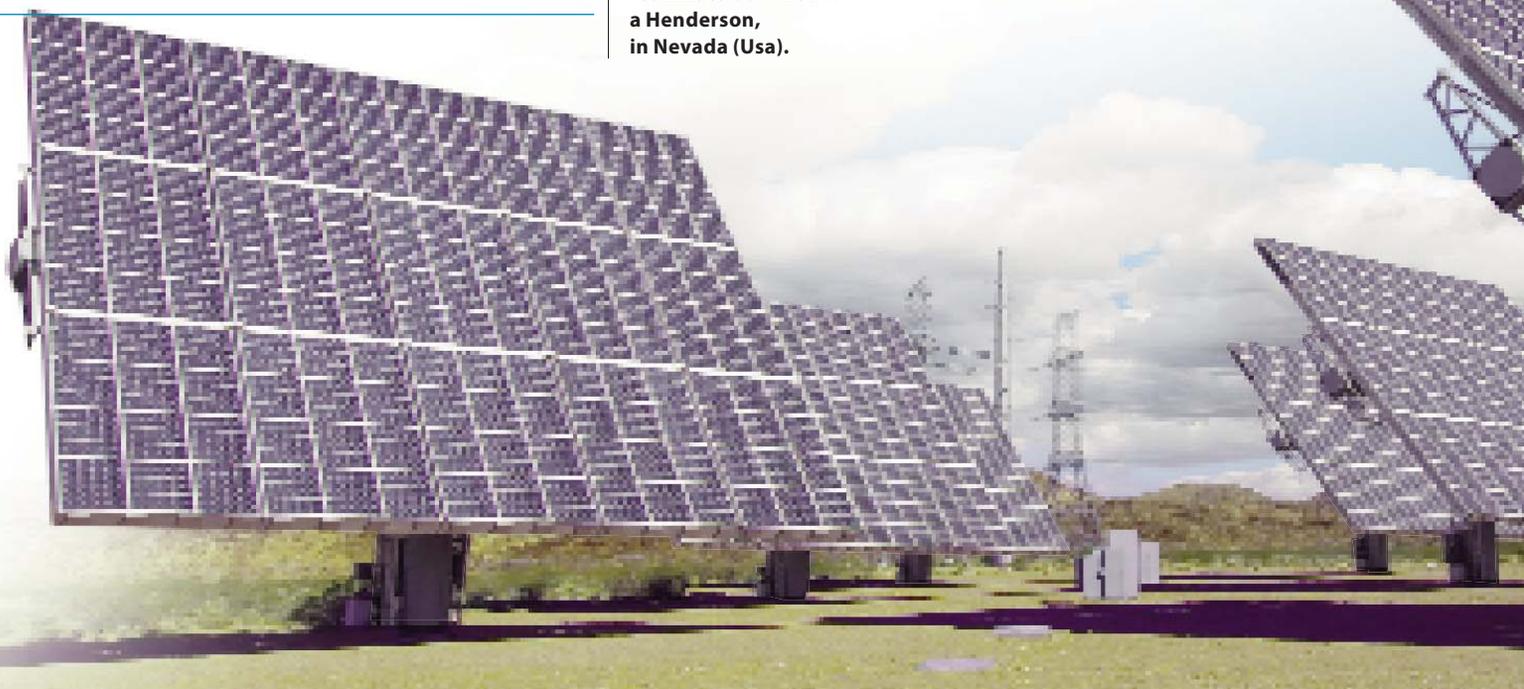
Il segnale proveniente dal sensore (85) viene elaborato dal dispositivo (90), un *lock-in* integrato. Il *lock-in* può essere preceduto e seguito da amplificatori operazionali ad alte prestazioni al fine di adattare il segnale in ingresso ai livelli di funzionamento del *lock-in* e il segnale in uscita alle esigenze di un dispositivo a valle. Utilizzando un opportuno circuito integrato è possibile realizzare un completo sistema *lock-in* con prestazioni molto elevate.

L'apparato radiometrico (8) è previsto per funzionare sia in ambiente interno sia in ambiente esterno. A questo scopo esso comprende anche un alimentatore elettrico (91) che alimenta tutti i blocchi del sistema, uno stabilizzatore (92) che elimina i disturbi di rete e un regolatore di carica (93) che effettua un controllo intelligente di batterie elettriche (94) per quanto riguarda i cicli di carica e scarica. Tutta l'elettronica è montata a bordo dell'apparato radiometrico (8) e raffreddata mediante una ventola.

È anche possibile prevedere la presenza di più di un fototransistor, così come la motorizzazione di eventuali finestre di area variabile che possono essere spostate mediante un attuatore o un opportuno motore del tipo passo-passo in ingresso all'apparato radiometrico (8) per effettuare misure ad area di ingresso variabile in automatico. Anche questa parte di elettronica è controllata dall'unità di controllo (84).

Infine, è possibile prevedere la presenza di uno strumento a bordo per eseguire le misure in tempo reale, raccogliere le stesse in una memoria in modo da consentire la lettura dei dati in laboratorio e salvarli in un computer per la successiva elaborazione.

Il parco Cpv di River Mountains WTF realizzato da Amonix a Henderson, in Nevada (Usa).



MODELLIZZAZIONE OTTICA

Anche il Disr è stato costruito con l'utilizzo di un programma Cad (vedi **Figura 4a** a pag. 00) e presenta le seguenti caratteristiche geometriche: due sfere di diametro 5 cm; porta d'ingresso quadrata di area 1,96 cm² (1,4 x 1,4 cm); diffusore conico alto 0,8 cm e con base di area 3,14 cm²; canale di collegamento di lunghezza 4 cm; apertura dell'insero diaframma di area variabile da 0,22 cm² a 2,3 cm²; porta d'uscita quadrata di area 1,46 cm² (1,21 x 1,21 cm). Le porte d'ingresso e d'uscita giacciono su piani tra loro perpendicolari.

Le proprietà ottiche del sensore Disr sono state studiate con il programma TracePro. La **Figura 4b** mostra un esempio di *raytracing* svolto sul modello, dove si possono distinguere tre tipologie di raggi, quelli in rosso con potenze da 0,7 W a 1 W, quelli verdi con potenze da 0,4 W a 0,7 W e quelli blu con potenze da 0,1 W a 0,3 W; i raggi in ingresso sono i più energetici perché non ancora integrati, mentre quelli nella sfera di uscita sono i più attenuati. Alla parete interna del Disr è stata assegnata una riflettività variabile dal 92 al 99%, in relazione alle esigenze, mentre alla superficie dello schermo (6) che si affaccia sulla porta d'ingresso è stata assegnata una riflettività speculare del 97%, costante con l'angolo d'incidenza e con la lunghezza d'onda. L'assorbitore posto sulla finestra d'uscita ha invece un'assorbanza del 100%.

→ Analisi del flusso all'interno del Disr

Una volta impostati i parametri dimensionali e ottici, è stata fatta una prima serie di simulazioni volte a verificare la distribuzione del flusso all'interno delle due sfere e sul rivelatore posizionato all'uscita. Il Disr è stato modellato senza inserto, quindi con area del diaframma di 2,3 cm² e con una riflettività di parete R_w del 95%. Le prime simulazioni hanno riguardato l'omogeneità del flusso all'interno delle due sfere e a tale scopo, come nel Dcr, sono stati utilizzati per ogni sfera sei spicchi di superficie virtuale per rilevare il flusso incidente [2]. Per queste misurazioni sono state fatte simulazioni con 100.000 raggi in entrata con un flusso di 1 W per raggio. Come asse di

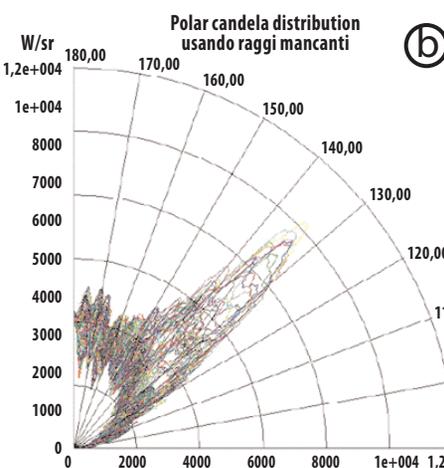
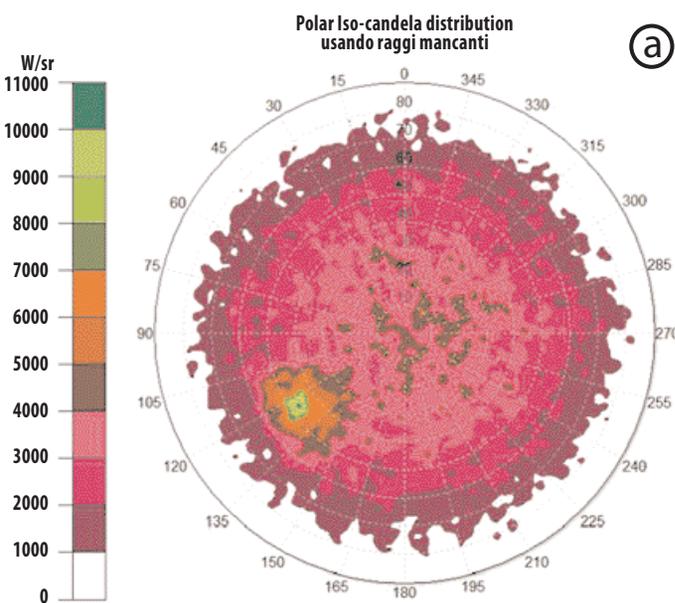


Figura 7. Distribuzione angolare del flusso (W/m²) in uscita dal ricevitore del Disr per 500.000 raggi: (a) Polar Iso-candela distribution (angoli azimutali sulla circonferenza e angoli polari sul raggio); (b) Polar candela distribution (angoli polari sulla circonferenza e plot di curve a diversi angoli azimutali).

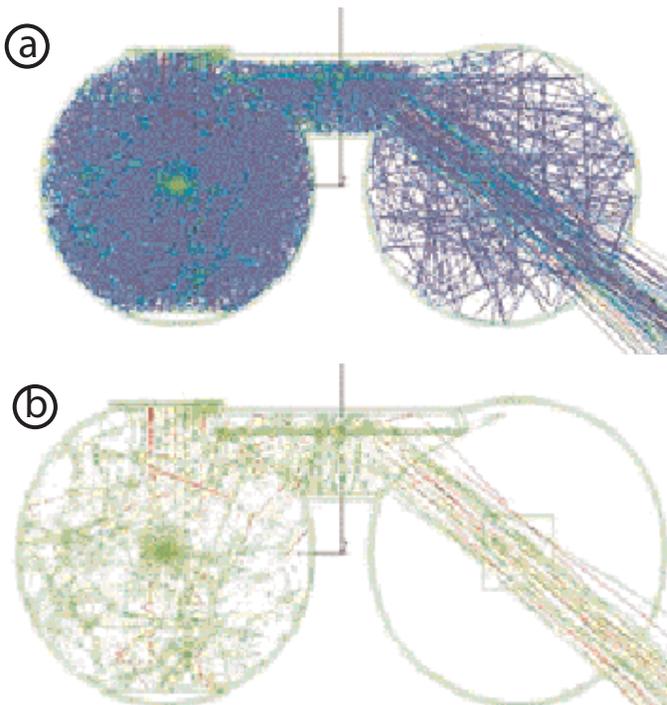


Figura 8. In (a), percorso dei raggi all'interno del Disr : è stato selezionato anche un fondo di raggi integrati (in blu). In (b), selezione dei raggi più energetici (in verde e in rosso) attraverso metodologie di elaborazione dell'immagine.

Concentrazione fv

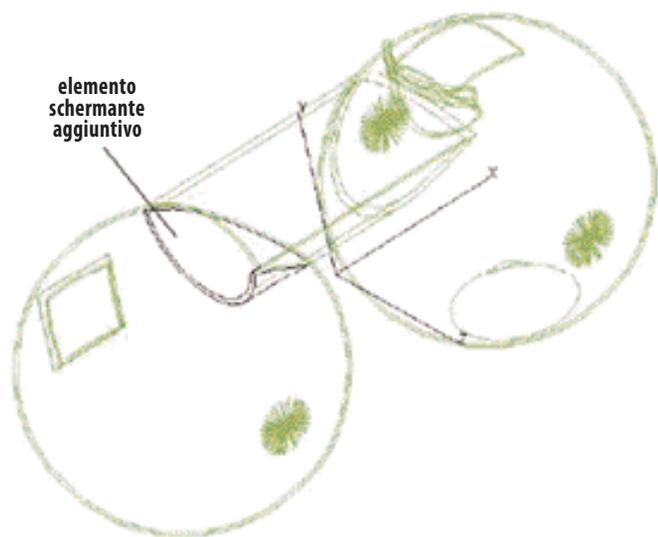


Figura 9. Modello ottico del sensore Disr modificato con TracePro.

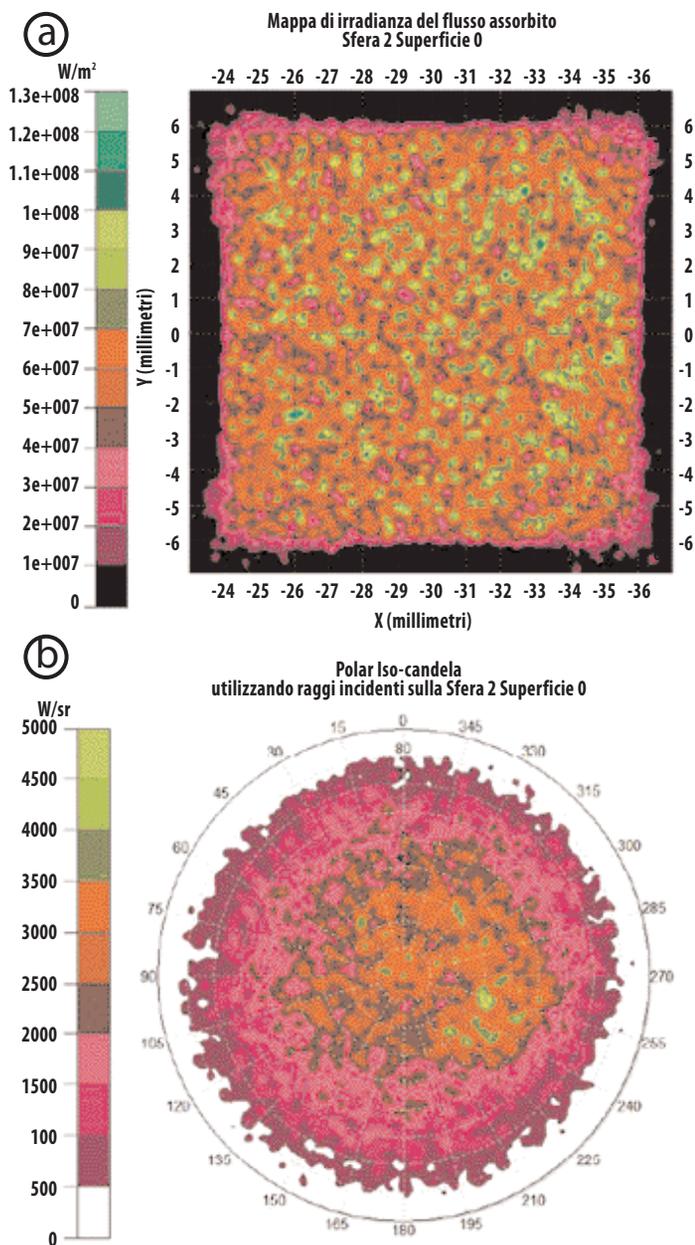


Figura 10. Mappa d'irradianza (a) e mappa dell'intensità radiante (b) del rivelatore del Disr dopo la modifica al progetto.

rotazione degli spicchi è stato preso per la prima sfera l'asse Y, passante per l'apertura d'ingresso e per il centro della sfera, mentre per la seconda sfera l'asse Z, passante per l'apertura d'uscita e per il centro della sfera. La distribuzione del flusso nelle due sfere è mostrato dagli istogrammi della **Figura 5** (vedi a pag.00).

Il flusso all'interno della prima sfera è molto uniforme; nella seconda sfera lo è meno perché fortemente influenzata dal canale di collegamento (4).

→ Analisi del flusso in uscita

Per studiare le caratteristiche ottiche del flusso in uscita dal Disr, abbiamo dapprima analizzato la sua distribuzione spaziale sul ricevitore ideale, impostando un'area del diaframma di 2,3 cm² e una riflettività di parete R_w del 95%.

La **Figura 6** (vedi a pag. 00) mostra una mappa d'irradianza della superficie, ottenuta con 500.000 raggi di simulazione, dalla quale scaturisce una elevata omogeneità spaziale dell'irradianza incidente.

La distribuzione angolare del flusso in uscita è mostrata invece nei due diagrammi polari di **Figura 7** (vedi a pag. 00). Si nota un fondo lambertiano (intensità che varia come il coseno dell'angolo polare [1]), ma è presente anche un forte picco nell'intervallo 40°-50° dell'angolo polare e 120°-130° dell'angolo azimutale. Se si selezionano i raggi di questa regione e si va a vedere la loro origine, si trova che tali raggi sono i più energetici, in quanto hanno subito solo poche riflessioni nella prima sfera e nel canale di collegamento prima di raggiungere la seconda sfera.

Il percorso di questi raggi si può meglio apprezzare dal *ray-tracing* esemplificativo mostrato in **Figura 8** (vedi a pag. 00), e si può notare che i raggi che vanno a popolare il picco d'intensità radiante, messo bene in evidenza nella **Figura 7b**, provengono direttamente dal canale di collegamento (4).

→ Modifiche al Disr

I risultati precedenti sulla distribuzione angolare del flusso in uscita ci hanno costretto a una leggera modifica del progetto originale del Disr. Per ovviare al problema del picco sull'intensità radiante (vedi **Figura 7b**), si è provveduto a modificare il canale di collegamento (4), prolungandolo con un elemento schermante nella seconda sfera (3). In tal modo l'azione integrante del canale (4) viene prolungata e viene evitato il picco d'intensità radiante in uscita. La **Figura 9** mostra la nuova versione del sensore del Disr.

La distribuzione spaziale e angolare del flusso sono state rimodellate e sono riportate, rispettivamente, nella **Figura 10a** e nella **Figura 10b**. Si può notare ora il netto miglioramento apportato in termini di uniformità sia dell'irradianza (W/m²) sia dell'intensità radiante (W/sr).

→ Studio del fattore di attenuazione

Una volta verificato il funzionamento corretto del radiometro in termini di distribuzione del flusso al suo interno, è stato studiato l'andamento del fattore di attenuazione f_A^0 per il flusso [1] in funzione delle dimensioni della porta intermedia (diaframma) tra le due sfere e della riflettanza di parete.

Le simulazioni sono state fatte per aree dell'inserto A_{fco} pari a: 0,22 cm², 0,49 cm², 0,76 cm², 1,07 cm², 1,25 cm², 1,51 cm², 1,77 cm², 2,01 cm², 2,13 cm², 2,19 cm², e infine per il Disr senza inserto con un'area intermedia di 2,3 cm² e riflettanze della sfera (R_w) dal 92% al 99%. I raggi in ingresso sono stati per ogni prova 5.500.000 con un flusso per raggio di 1 W.

Dalla **Figura 11** (vedi nella pagina a fianco) si trova un andamento per la grandezza f_A^0 che è molto simile a quello

trovato per il Dcr, ovvero pressoché lineare in scala log/log, con una variazione assoluta di due ordini di grandezza di f_A^Φ al variare di A_{fco} . L'andamento di f_A^Φ in funzione della riflettività di parete è anch'esso simile a quello trovato per il Dcr.

→ **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 Disr 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 12** (vedi a pag. 00) che mostra il fattore di attenuazione normalizzato in funzione della divergenza angolare.

Si trova una variazione percentuale massima del fattore di attenuazione intorno all'1%, sensibilmente inferiore a quella trovata per il Dcr (4-5%), e comunque idonea per gli standard previsti per un misuratore universale. C'è da tener conto inoltre che questo risultato è stato ottenuto nelle peggiori condizioni di lavoro, ovvero con l'inserto intermedio completamente aperto ($A_{fco} = 2,3 \text{ cm}^2$). Per aree dell'inserto più basse, che corrispondono a fattori di attenuazione più alti, la dipendenza di f_A^Φ dall'area dell'inserto si riduce ulteriormente perché aumenta il numero medio di riflessioni.

L'andamento della **Figura 12** è in sostanza la registrazione in uscita della memoria di quanto accade in ingresso in termini di geometria del fascio; c'è da considerare però che, più si ostruisce il diaframma riducendo l'area A_{fco} , maggiore è il numero medio di riflessioni e minore la memoria dello stato del fascio d'ingresso.

→ **Come lo spettro della luce concentrata in ingresso viene alterato dal Disr**

L'ultima indagine è stata verificare come la riflettanza spettrale del rivestimento interno del sensore influenza lo spettro della radiazione in entrata al Disr e, quindi, che tipo di spettro si ha all'uscita dell'apparecchio. Nelle prove precedenti si è definito un fattore di attenuazione, ma si è sempre supposto che non venisse alterato lo spettro incidente.

In realtà, lo spettro viene alterato per il fatto che la parete interna riflette in maniera diversa le diverse lunghezze d'onda, ovvero ha una riflettanza spettrale non piatta; di conseguenza, il fattore di attenuazione dovrà essere espresso in funzione della lunghezza d'onda: $f_A^\Phi = f_A^\Phi(\lambda)$.

La trattazione teorica completa della modifica dello spettro da parte del radiometro è stata fatta nel numero precedente di questa rivista [1] trattando il radiometro Dcr. Qui ci limitiamo a ricordare che, per conoscere l'alterazione subita dallo spettro, è necessario per prima cosa calcolare il numero medio di riflessioni \bar{N} che la luce subisce all'interno del Disr, che è una funzione della geometria del radiometro. Il numero medio \bar{N} si ottiene effettuando due simulazioni con due diverse riflettività di parete R_w e R'_w e misurando il corrispondente flusso in uscita:

$$\bar{N} = \frac{\log\left[\frac{\Phi_{out}(R_w)}{\Phi_{out}(R'_w)}\right]}{\log\left[\frac{R_w}{R'_w}\right]} \quad [1]$$

Per il Disr con apertura dell'inserto di $2,3 \text{ cm}^2$ si trova $\bar{N} = 36$. La modificazione dello spettro si ottiene allora conoscendo la riflettività spettrale del rivestimento, $R_w(\lambda)$,

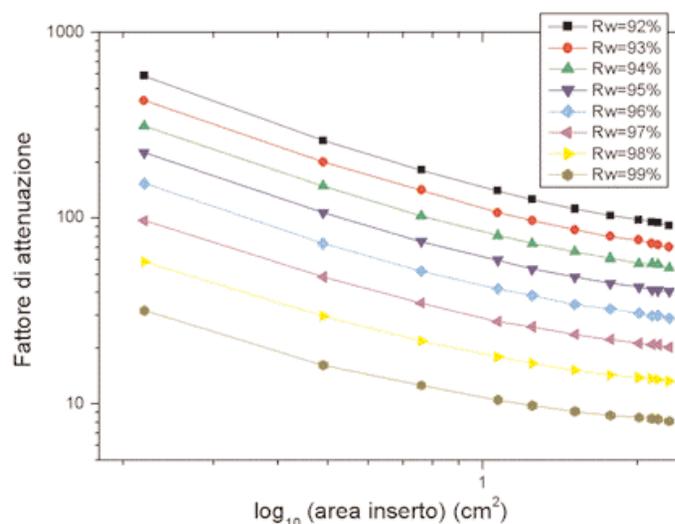
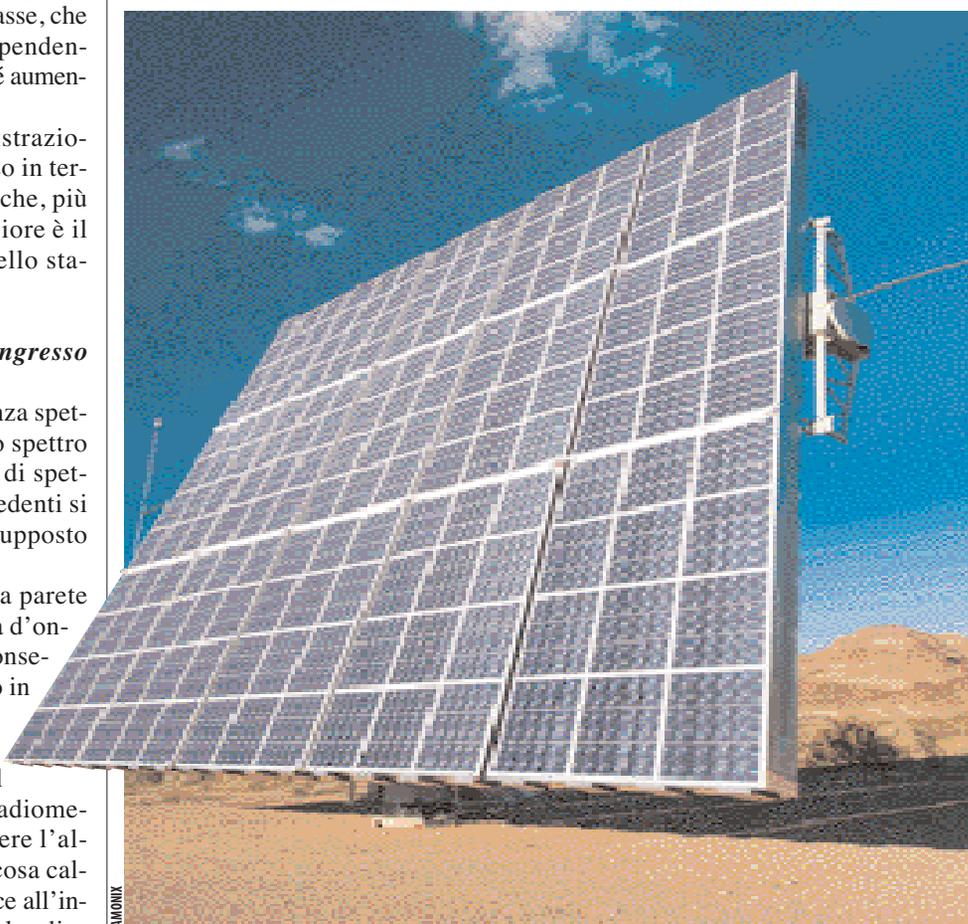


Figura 11. Dipendenza in scala log/log del fattore di attenuazione per il flusso in funzione dell'area dell'apertura dell'inserto 5 (vedi Figura 1) per diversi valori della riflettività di parete.



e calcolando la grandezza $f_A^\Phi(\lambda, \lambda')$, che abbiamo definito nell'articolo precedente [1] e che rappresenta il fattore di attenuazione relativo del radiometro:

$$f_A^\Phi(\lambda, \lambda') = \frac{f_A^\Phi(\lambda')}{f_A^\Phi(\lambda)} = \left[\frac{[R_w(\lambda)]}{[R_w(\lambda')]} \right]^{\bar{N}} \quad [2]$$

La grandezza $f_A^\Phi(\lambda, \lambda')$ è riportata nel numero precedente di *PV Technology* [1] per un *coating* commerciale di BaSO_4 . L'effetto che questo *coating* avrebbe sullo spettro della com-

Concentrazione fv

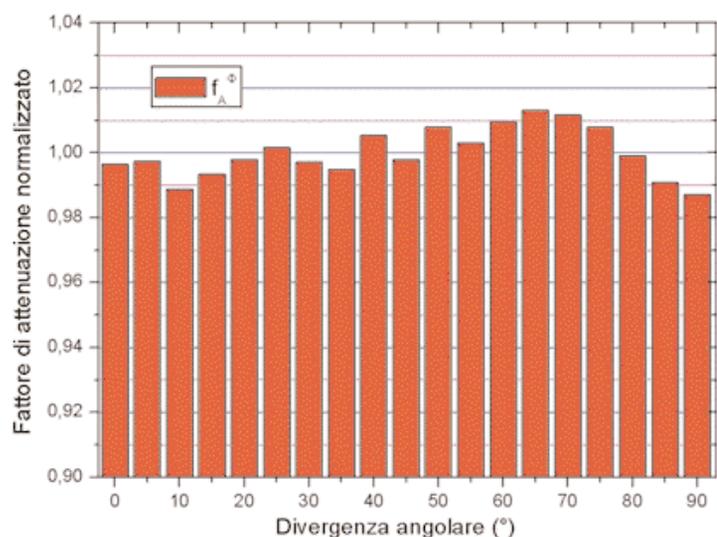


Figura 12. Dipendenza del fattore di attenuazione f_A^ϕ normalizzato dall'angolo di divergenza del fascio concentrato in ingresso.

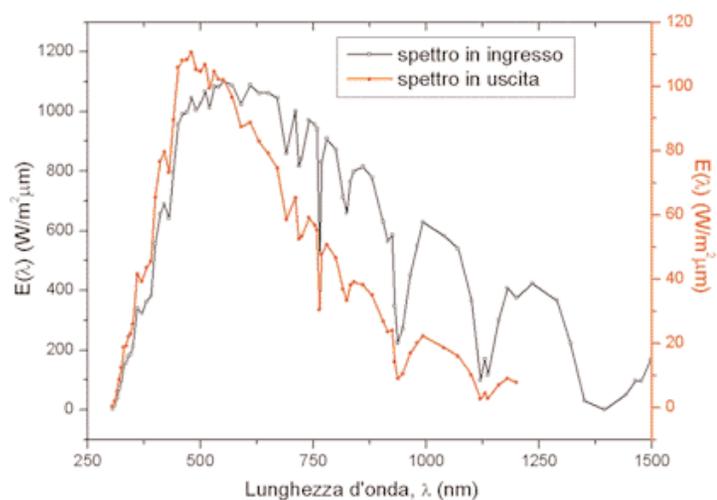


Figura 13. Alterazione subita dalla componente diretta della radiazione solare (quella in ingresso a un concentratore solare) all'interno del Disr adoperando un rivestimento commerciale di BaSO₄.

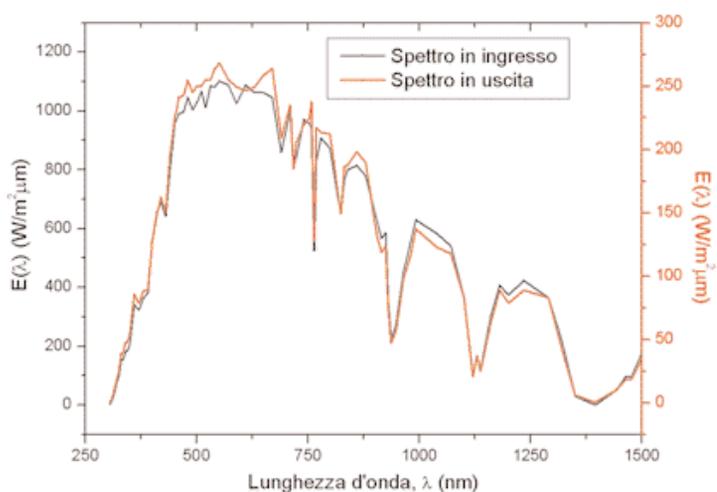


Figura 14. Alterazione subita dalla componente diretta della radiazione solare all'interno del Disr adoperando il rivestimento Zenith® della SphereOptics.



Installazione Cpv realizzata da Amonix in Nevada (Usa).

ponente diretta standard della radiazione solare è mostrato in **Figura 13**, ed è eccessivo per un radiometro universale.

Per questo motivo abbiamo previsto per il Disr l'uso di un rivestimento dalle proprietà ottiche superiori: lo Zenith® della SphereOptics, un materiale a base di PTFE, con proprietà riflettive intorno al 99% nell'intervallo 350 - 1.500 nm, lo stesso nel quale operano i fotorivelatori previsti per il Disr. Sostituendo il *coating* di BaSO₄ con lo Zenith® si ottiene una modificazione dello spettro solare molto trascurabile, come mostrato in **Figura 14**.

CONCLUSIONI

In conclusione, abbiamo analizzato in grande dettaglio il progetto e le proprietà ottiche del radiometro Disr (*Double integrating sphere radiometer*) per luce solare concentrata. Dopo aver illustrato le sue caratteristiche dimensionali, ne abbiamo analizzato il comportamento ottico, mostrando i miglioramenti ottenuti rispetto alla versione precedente, il radiometro Dcr (vedi *PV Technology 2 del 2011*), in termini di minore dipendenza della risposta dalla divergenza angolare del fascio in ingresso e di minore alterazione dello spettro della radiazione in ingresso. ■

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Parretta, N. Baroni, *Il radiometro Dcr*, PV Technology, n. 2/2011, pp. 40-47
- [2] A. Parretta, N. Baroni, *Radiometri per sistemi CPV*, PV Technology, n. 1/2011, pp. 34-39
- [3] M. Armani, A. Parretta, E. Milan, *Dispositivo di attenuazione di un fascio di radiazione elettromagnetica*, Brevetto It., Application N. RM2007A000647, 14 Dicembre 2007.