

Unità ENE - FOTO	Classificazione ENE EGE 04056	Distribuzione: Libera
Commessa SOLTERM Ottica P00V: Progettazione e realizzazione di radiometri innovativi per impianti Solari Termodinamici.		Parole chiave: Radiometro, radiazione solare, concentrazione, sfere integratrici
Attività: .Messa a punto di metodi per la caratterizzazione di fasci concentrati di radiazione.		

Titolo:

“Radiometro a doppia cavità per le alte densità di flusso luminoso”

Autori:

Antonio Parretta, Giuseppe Nenna, Michele Pellegrino, Giovanni Flaminio,
Stefano Bolognesi**Sommario:**

E' descritto un metodo e la relativa apparecchiatura per la misura dell'intensità di fasci di radiazione concentrata, in particolare di radiazione prodotta nei sistemi solari del tipo fotovoltaico, termico o termodinamico. Il metodo consente la misura della potenza totale del fascio, del suo profilo d'intensità e della distribuzione spettrale dell'intensità misurata. La radiazione concentrata è raccolta dal radiometro attraverso una finestra d'ingresso e perviene ad una prima cavità nella quale essa viene integrata e attenuata una prima volta. Una porzione della radiazione raccolta nella prima cavità viene trasferita ad una seconda cavità attraverso una porta con apertura regolabile. Nella seconda cavità la radiazione viene integrata e attenuata una seconda volta, e la sua intensità e distribuzione spettrale viene misurata con una strumentazione convenzionale. Scegliendo opportunamente l'apertura della finestra d'ingresso nella prima cavità e quella della porta di separazione tra le due cavità, è possibile regolare il livello di attenuazione della radiazione incidente a valori compatibili con il funzionamento della strumentazione convenzionale. Il radiometro a cavità così descritto ha caratteristiche che lo rendono un radiometro universale, cioè adatto ad essere impiegato in diverse situazioni applicative e facilmente realizzabile in una versione portatile. Esso trova applicazione soprattutto nella misura e nel monitoraggio della radiazione negli impianti solari a concentrazione e nella caratterizzazione di fasci di radiazione concentrata nell'intervallo del Vis-NIR in uso negli impianti sperimentali di laboratorio. Il radiometro a doppia cavità effettua una misura stazionaria della radiazione concentrata ed inoltre indipendente dalla direzione di provenienza delle varie componenti del fascio concentrato.

4							
3							
2							
1							
0	Emissione	A. Parretta	10/01/05	C. Privato	12/01/05	C. Privato	12/01/05
Rev	Descrizione	Redazione	Data	Convalida	Data	Approvazione	Data

Indice

1. Introduzione.....
2. Un radiometro innovativo per le alte densità di flusso luminoso
3. Descrizione tecnica dettagliata del radiometro DCR
- 3.1 Modellazione ottica e termica
- 3.2 Realizzazione pratica
4. Conclusioni.....

1. INTRODUZIONE

In questi ultimi anni si è manifestato un rinnovato interesse verso i sistemi solari a concentrazione, sia di tipo fotovoltaico che termodinamico [1]. Nel settore fotovoltaico, la motivazione principale che spinge ad esplorare con maggiore convinzione la strada della concentrazione si basa sulla considerazione che il costo del dispositivo (cella solare) negli impianti solari piani, in un futuro scenario di produzione dell'energia fotovoltaica su larga scala, avrebbe un impatto economicamente non sostenibile, soprattutto se si pensa all'uso di silicio cristallino come materiale assorbitore. Parallelamente, nel settore termodinamico, si è consolidata la convinzione che la scelta dell'idrogeno come vettore energetico alternativo ai combustibili fossili sia una strada obbligata per un futuro dell'umanità sostenibile ed eco-compatibile [2-6]. Questi due settori strategici delle fonti rinnovabili sono caratterizzati dall'impiego di radiazione solare concentrata, per livelli di concentrazione che nel caso del fotovoltaico si attestano intorno alle decine o centinaia di soli, mentre nel caso della produzione d'idrogeno possono variare dalle centinaia alle migliaia di soli (100 W/cm^2). L'uso sistematico di radiazione solare concentrata, ovvero caratterizzata da elevate densità di flusso, pone l'esigenza di sviluppare metodi radiometrici innovativi. E' necessario anche disporre di una strumentazione che si adegui alla particolare geometria dei concentratori, molto variegata se si tiene conto che nel settore fotovoltaico sono stati sviluppati sia sistemi a concentrazione lineare (a due dimensioni), con ricevitore piano, che sistemi a concentrazione "point-focus" (a tre dimensioni), sempre con ricevitore piano, e che anche i sistemi a concentrazione di tipo termodinamico possono essere del tipo lineare o del tipo "point-focus".

La misura convenzionale della radiazione solare, radiazione che interessa soprattutto l'intervallo spettrale compreso tra 300 e 2500 nm, può essere effettuata con diversi tipi di fotorivelatori [7]. Questi si differenziano per le loro caratteristiche di responsività (A/W), intervallo di potenza, intervallo spettrale e temperatura di lavoro. I rivelatori adatti per la misura della radiazione solare sono potenzialmente quelli di tipo termico, quali le termopile, i bolometri e i rivelatori piroelettrici. Questi hanno un intervallo di sensibilità spettrale che copre largamente l'intervallo della radiazione solare e inoltre non presentano elevate sensibilità, non richieste d'altra parte dalla nostra particolare applicazione. Poi esistono i rivelatori di tipo fotovoltaico, generalmente basati sull'uso di silicio cristallino, anch'essi largamente impiegati per misure radiometriche, ma che si differenziano dai primi per il fatto di avere una sensibilità limitata all'intervallo spettrale compreso tra 0.3 e 1.1 μm . I rivelatori termici sono vantaggiosi per la loro risposta costante in funzione della lunghezza d'onda,

il che è importante per fornire la misura della potenza indipendente dalle variazioni spettrali della radiazione. L'intensità spettrale della componente diretta del sole, quella coinvolta nel processo di concentrazione, può cambiare fortemente nell'arco della giornata [8]; da questo punto di vista i rivelatori di tipo termico ne sono indipendenti, mentre quelli di tipo fotovoltaico risentono di queste variazioni. Trattandosi nel caso attuale di misurare una radiazione con alta densità di flusso, ovvero caratterizzata da flussi luminosi di molto superiori ad 1 *sole* (100 mW/cm^2 o 1 kW/m^2), i radiometri convenzionali che lavorano con i rivelatori suddetti possono essere impiegati soltanto associandoli a un sistema di attenuazione dell'intensità della radiazione. I metodi possono essere diversi. Possono essere usati filtri neutri con densità ottica fino a circa $OD=4$, corrispondenti ad una trasmittanza di 10^{-4} , che sono commercialmente disponibili, secondo lo schema di Figura 1. Per flussi molto alti è possibile unire i singoli filtri, sommando in tal caso le loro densità ottiche. In Fig. 1 il fotorivelatore (fr) è protetto dalla radiazione concentrata (fc) tramite uno o più filtri neutri (fn), raffreddati dalla ventola (v), e la sua fotocorrente è letta dal radiometro (rad). Il metodo di misura illustrato in Fig. 1, comunque, presenta due principali difficoltà. La prima è che il filtro neutro, o il set di filtri neutri (fn), trasmette la radiazione incidente con una modalità che dipende dalla direzione di provenienza della luce, e quindi dalla divergenza locale del fascio, divergenza inevitabile in un fascio concentrato di radiazione. Il filtro neutro, inoltre, è soggetto ad un surriscaldamento tanto più alto quanto più lo è l'intensità della radiazione incidente e quindi richiederebbe un adeguato raffreddamento.

Intensità d'irraggiamento fino a poche centinaia di soli (200-300) possono essere misurate esponendo direttamente alla radiazione concentrata celle fotovoltaiche appositamente realizzate per i sistemi fotovoltaici a concentrazione. Ne sono un esempio le celle SunPower del tipo HECO (High-Efficiency COncentrator) oppure HEDA (High-Efficiency Dense Array) [9]. Un radiometro di questo tipo è mostrato in Fig. 2.

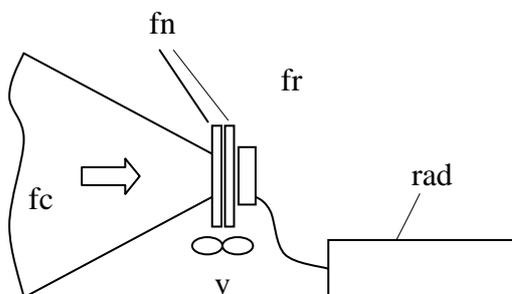


Figura 1. Schema di misura della radiazione concentrata col metodo dei filtri neutri (fn). (fc) fascio concentrato; (fr) fotorivelatore; (rad) radiometro; (v) ventola di raffreddamento.

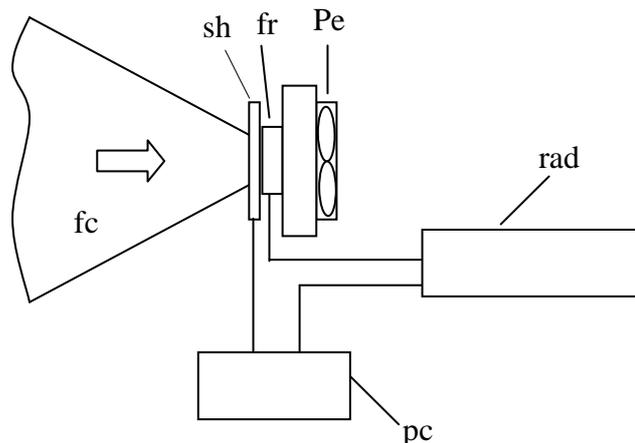


Figura 2. Misura diretta della radiazione concentrata con celle solari che sopportano livelli di concentrazione fino a centinaia di soli. (sh) shutter; (Pe) sistema di raffreddamento Peltier; (pc) computer.

La cella a concentrazione (fr) è termoregolata da un sistema Peltier (Pe) ed esposta alla radiazione concentrata per un tempo breve (poche decine di msec) attraverso lo shutter (sh) comandato da un elaboratore (pc). La fotocorrente misurata dal radiometro (rad) è direttamente collegata al livello d'irraggiamento su (fr), a parità di spettro della radiazione, in virtù della proprietà di linearità tra fotocorrente e irraggiamento in una cella solare.

Il radiometro di Fig. 2 presenta alcuni inconvenienti: i) può operare soltanto con livelli di radiazione compatibili con quelli della cella solare a concentrazione impiegata (max $\approx 200-300$ soli per celle al silicio cristallino), e il controllo del fattore di attenuazione, da effettuare ad esempio tramite un diaframma, non è né agevole né preciso; ii) per evitare il surriscaldamento della cella, la misura deve essere di tipo impulsivo, il che complica alquanto la strumentazione elettronica necessaria; iii) la sua risposta in fotocorrente dipende in una certa misura dall'incidenza del fascio, ovvero dalla sua divergenza, essendo che la riflettività della cella non è costante con l'angolo d'incidenza; iv) la distribuzione dell'intensità della radiazione sulla cella non è uniforme; v) una cella solare a concentrazione, con area di $\approx 1 \text{ cm}^2$, non è il sensore ottimale per esplorare piccole zone del fascio.

La calibrazione dei radiometri discussi presenta qualche difficoltà, anche per l'assenza di una procedura di calibrazione definita tramite un protocollo da parte del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano), ma esistono diverse modalità per effettuarla al momento presente, a seconda delle apparecchiature a disposizione. Noi ci soffermeremo qui ad illustrarne due, una delle quali, la prima, è stata da noi adottata per calibrare il radiometro oggetto della presente relazione.

Operando con un simulatore solare a luce collimata, del tipo di quelli comunemente impiegati per caratterizzare i moduli fotovoltaici piani, si dovrà realizzare un sistema per concentrare la luce, ad esempio con una lente di Fresnel. Prima di concentrare la luce, si misura la radiazione del fascio collimato con una normale cella campione, poi si misura la fotocorrente del fotorivelatore. Successivamente si concentra la radiazione con il sistema a lente, regolando il livello di concentrazione attraverso la regolazione dell'apertura di un diaframma posto di fronte alla lente, e si procede alla misura della fotocorrente del fotorivelatore sotto irraggiamento concentrato. In virtù della proprietà di linearità tra fotocorrente e irraggiamento, il radiometro potrà essere calibrato a vari livelli d'irraggiamento, ricavando alla fine una retta di calibrazione della fotocorrente in funzione dell'intensità d'irraggiamento o irradianza. Questo sistema di calibrazione presenta un punto debole nell'uso della lente di Fresnel per concentrare la luce, sia in quanto la lente nel suo complesso altera lo spettro della sorgente, sia perchè le diverse aperture imposte col diaframma possono determinare un diverso spettro della luce trasmessa dalla lente con la conseguente non congruenza tra le varie misure.

In alternativa, disponendo di un simulatore solare provvisto di sorgente quasi puntiforme, che irraggi in una certa regione dello spazio secondo la legge dell'inverso del quadrato della distanza, la calibrazione della cella a concentrazione alle diverse intensità luminose si può effettuare variando la distanza tra cella e sorgente. Questa modalità di misura presenta il vantaggio che non viene interposto alcun componente ottico tra sorgente e cella e quindi lo spettro della radiazione concentrata incidente sulla cella corrisponde a quello noto della sorgente, ed è inoltre costante.

Altri radiometri di tipo tradizionale, adattati per misure di fasci concentrati con modalità simili a quelle descritte, presentano comunque qualche inconveniente di quelli citati precedentemente.

In base a quanto illustrato sinora, risulta conveniente progettare uno strumento innovativo per la misura della radiazione concentrata, che superi la maggior parte degli inconvenienti sopra elencati. Esso dovrà avere le seguenti caratteristiche principali: i) essere di tipo universale, ovvero poter essere impiegato con facilità in diverse applicazioni del settore dell'energia solare operante con radiazione concentrata; ii) avere un intervallo di misura dell'intensità facilmente regolabile e il cui limite superiore si aggiri intorno alle migliaia di *sol*; iii) poter essere realizzato in una versione portatile, adatta per poterlo impiegare all'esterno sui vari impianti solari a concentrazione; iv) permettere una misura stazionaria della radiazione, senza che ciò comporti un surriscaldamento del fotorivelatore, evitando la complessa elettronica associata a misure di tipo impulsivo; v) permettere una facile regolazione del fattore di attenuazione dell'intensità della radiazione; vi) avere una risposta in fotocorrente indipendente dalla distribuzione angolare del fascio nella finestra

 <p>Unità Tecnico Scientifica Fonti Rinnovabili e Cicli Energetici Innovativi</p>	<p>Documento EGE 04009</p>	<p>Pag. 7 di 46 Rev. 0</p>
---	---------------------------------------	--------------------------------

d'ingresso; vii) essere operativo nell'intervallo di lunghezze d'onda caratteristiche della luce solare ($\lambda \approx 350-2500$ nm).

2. UN RADIOMETRO INNOVATIVO PER LE ALTE DENSITA' DI FLUSSO LUMINOSO

E' illustrato un metodo innovativo di misura della radiazione luminosa concentrata e il corrispondente apparato, che supera i limiti dei radiometri convenzionali per basse densità di flusso luminoso. Lo strumento, denominato "Radiometro a Doppia Cavità", brevemente DCR dall'inglese "Double Cavity Radiometer", è basato 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 almeno due cavità con funzioni di sfere integratrici. Le cavità integranti possono essere costituite o da sfere integratrici comunicanti tra loro attraverso delle aperture regolabili oppure da cavità scavate all'interno di un blocco di metallo e di un altro materiale facilmente lavorabile, anch'esse comunicanti tra loro attraverso delle aperture regolabili. La funzione da esse svolta sarà in ogni caso la stessa dal punto di vista ottico. Il numero di cavità attraverso le quali la radiazione viene integrata e successivamente attenuata non è limitata a due, ma può essere anche superiore a seconda del grado di attenuazione della radiazione che si vuole raggiungere. Il primo radiometro di questo tipo da noi realizzato ed illustrato nel seguito prende il nome di DCR1. 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 e per la misura dello spettro. I rivelatori sono tipicamente del tipo a fotodiode o rivelatore piroelettrico e sono affacciati direttamente all'interno della seconda cavità, insieme ad una fibra ottica che collega la cavità ad uno spettrometro o spettroradiometro. Gli accessori principali del radiometro sono quindi uno o più amperometri o radiometri per la misura della fotocorrente, uno spettrometro per la misura dello spettro della radiazione e secondariamente un sistema di termoregolazione per stabilizzare la temperatura dei fotorivelatori. Il radiometro a doppia cavità è stato concepito come uno strumento semplice e maneggevole, che si possa inserire in qualunque tratto del fascio concentrato e inoltre che abbia un ingombro limitato. Nella versione preferita, il radiometro è di tipo portatile e adatto ad essere alloggiato all'interno di un generico concentratore solare, nel punto più adatto per la caratterizzazione del fascio concentrato. Uno schema di radiometro DCR è mostrato in Fig. 3, dove sono indicate le seguenti parti principali: (ra)

corpo o base del radiometro, o prisma; (si1) prima cavità; (si2) seconda cavità; (fr1) fotorivelatore 1; (fr2) fotorivelatore 2; (rad1) radiometro 1 a bassa intensità; (rad2) radiometro 2 a bassa intensità; (sp) spettrometro; (fco) porta di separazione tra le due cavità; (fin) finestra d'ingresso della radiazione; (fo) fibra ottica. Il funzionamento di massima del radiometro DCR è di seguito descritto. Il fascio concentrato incide dall'alto sulla finestra d'ingresso (fin) della prima cavità (si1). Una porzione del fascio, quando si tratti di una misura del profilo dell'intensità, o tutto il fascio quando si tratti di una misura della potenza totale trasmessa dal fascio, è raccolta dalla prima cavità (si1) e integrata grazie alle caratteristiche diffuse della parete interna della cavità, realizzata con materiali del tipo MgO, BaSO₄, o Spectralon® (Labsphere) [10]. In virtù dell'integrazione della radiazione nella cavità (si1), l'irradianza sulle pareti e sulle finestre della prima cavità è omogenea.

Parte della radiazione presente nella cavità (si1) è trasferita, tramite la finestra di separazione (fco), alla seconda cavità (si2), che può essere uguale o meno, nelle dimensioni, alla cavità (si1).

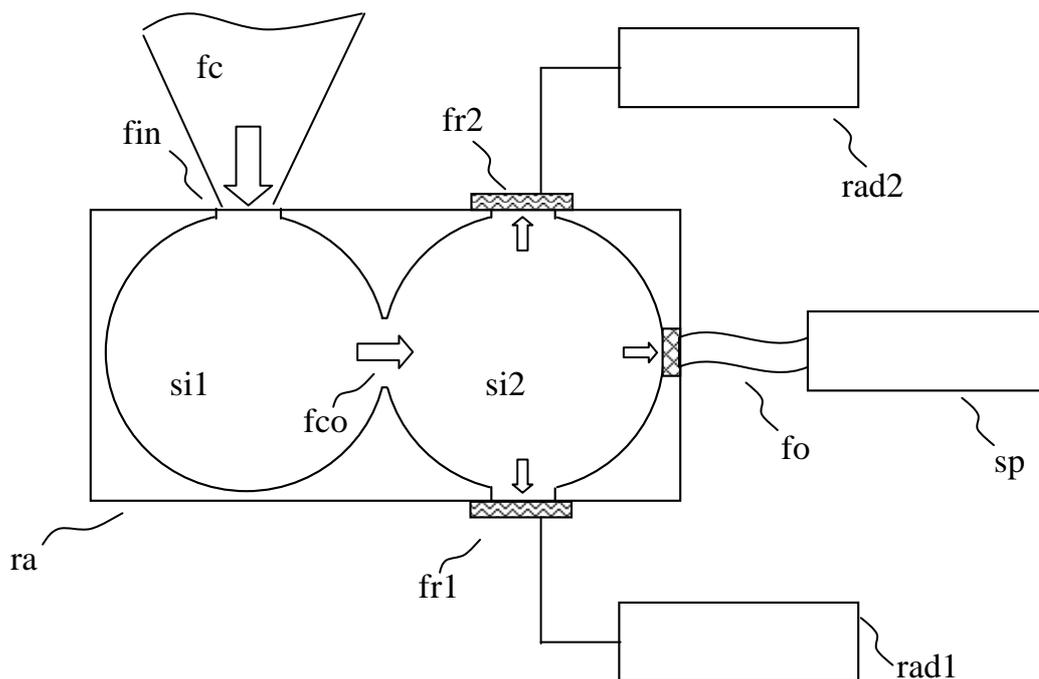


Figura 3. Schema generale del radiometro a doppia cavità (DCR). (fin) finestra d'ingresso; (si1) prima cavità; (si2) seconda cavità; (fco) porta di collegamento tra le due cavità; (fr1) primo fotorivelatore; (fr2) secondo fotorivelatore; (rad1) primo radiometro; (rad2) secondo radiometro; (fo) fibra ottica; (sp) spettrometro; (ra) corpo o base del radiometro a cavità. Nella figura non sono mostrati gli accessori.

Anche nella seconda cavità (si2) la radiazione sarà integrata e irraggerà in maniera omogenea le sue pareti e le aperture presenti in essa. Essa risulterà anche attenuata, perché il passaggio della radiazione dalla cavità (si1) alla cavità (si2) comporta un'attenuazione che si può calcolare conoscendo la geometria del radiometro, le proprietà riflesse delle sue pareti interne e di tutti i componenti affacciati alle singole cavità. La seconda cavità è corredata di una serie di sensori atti a misurare l'irradianza al suo interno; in particolare si tratta di fotorivelatori (fr1) del tipo a semiconduttore (fotodiodi), che hanno una risposta in frequenza non costante ma nota, a seconda del tipo di semiconduttore usato, e di fotorivelatori (fr2) di tipo piroelettrico, che hanno una risposta costante con la frequenza della radiazione e.m. [7]. Entrambi i due tipi di rivelatori, collegati ai rispettivi moduli di controllo, rispettivamente (rad1) e (rad2), costituiscono un sistema di misura radiometrico a bassa intensità, e sono in grado, grazie all'introduzione delle due (almeno) cavità, di misurare potenze incidenti del fascio concentrato ben al di là dei loro limiti. La seconda cavità è collegata, tramite la fibra ottica (fo), anche ad uno spettrometro (sp) che misura la distribuzione spettrale dell'intensità della radiazione al suo interno. Questa distribuzione, in condizioni di risposta piatta della riflettanza delle pareti del radiometro, corrisponde alla distribuzione dello spettro della radiazione all'ingresso del radiometro. La Fig. 3 mostra schematicamente, attraverso l'uso di frecce più o meno grandi, anche l'andamento dell'intensità della radiazione, a partire dall'ingresso in (fin), a quando essa è trasferita da (si1) a (si2) tramite l'apertura (fco), e infine a quando giunge, attenuata ma di pari intensità, sui tre rivelatori (fr1), (fr2) e (fo).

Il principio di funzionamento a blocchi della presente invenzione può essere schematizzato come mostrato in Fig. 4. L'intensità del fascio incidente in ingresso al radiometro, I_0 , viene attenuata una prima volta dal blocco A1, costituito dalla prima cavità integratrice, con un fattore di attenuazione f_1 , poi la radiazione perviene al blocco attenuatore A2, costituito dalla seconda cavità, dove la sua intensità viene ulteriormente attenuata di un fattore f_2 e quindi diventa pari a $I_0/f_1f_2 = I_0/f_A$. La radiazione perviene quindi ad un radiometro a bassa intensità (rad) dove la grandezza I_0/f_A viene misurata. Oltre al radiometro a bassa intensità, che dà una misura integrata sullo spettro della radiazione incidente, lo spettrometro (sp) misura la distribuzione dell'intensità in funzione della lunghezza d'onda della radiazione. Mentre i fotorivelatori del tipo (fr1) e (fr2) sono posti direttamente sulle finestre di (si2), e affacciati quindi all'interno della cavità, lo spettrometro (sp) è collegato con la seconda cavità mediante una fibra ottica (fo) fissata su una finestra della sfera (si2).

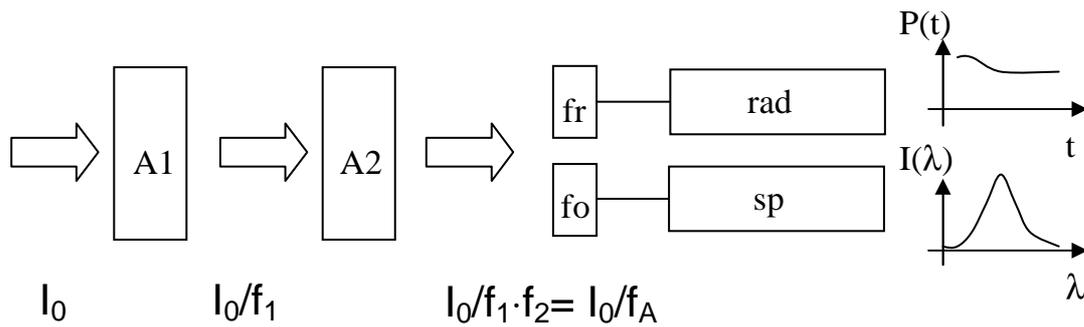


Figura 4. Schema a blocchi del radiometro DCR. L'intensità incidente I_0 viene ridotta di un fattore f_1 dal primo blocco A1, e di un fattore f_2 dal secondo blocco A2, e quindi la radiazione perviene al radiometro a bassa intensità con una intensità $I_0/f_1 \cdot f_2 = I_0/f_A$, attenuata di un fattore f_A controllato ed in grado di essere misurato adeguatamente. $P(t)$ misura della potenza in funzione del tempo; $I(\lambda)$ misura dell'intensità in funzione della lunghezza d'onda.

Il radiometro DCR è corredato al suo interno di palette o schermi ("baffles") che servono a ridurre le interferenze che si manifestano tra i vari componenti affacciati all'interno delle sfere integratrici, e la loro dimensione e collocazione sarà descritta in dettaglio in una sezione successiva. Anticipiamo qui che i baffles sono componenti essenziali delle sfere integratrici e devono essere dimensionati e posizionati accuratamente.

Nella sua configurazione completa, il radiometro DCR è corredato di altri componenti che ne rendono più affidabile il funzionamento. Essi vengono qui elencati brevemente e saranno discussi approfonditamente in una sezione seguente. Il corpo o base del radiometro (ra) è generalmente protetto nella sua parte anteriore, quella rivolta al fascio concentrato, da un pannello o schermo frontale, tipicamente di metallo, lucidato o rivestito di un rivestimento altamente riflettente, che ha lo scopo di ridurre il calore trasferito dalla radiazione incidente alla base del radiometro. Le pareti della prima cavità, quella che raccoglie il fascio incidente, sono esternamente circondate da una serie di radiatori alettati funzionanti a convezione d'aria che facilitano lo smaltimento del calore prodotto al suo interno per effetto della non perfetta riflettività delle pareti, ed evitano quindi che un surriscaldamento della cavità determini il deterioramento o il distacco del rivestimento diffusivo. Questi radiatori limitano inoltre il calore trasmesso per conduzione dalla prima alla seconda cavità e quindi ai sensori ivi presenti. 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 , che sarà calcolato e riportato in

una sezione seguente. Un ulteriore miglioramento del radiometro DCR consiste nella termoregolazione dei fotorivelatori (fr1) e (fr2), i quali, per effetto della variazione discreta del fattore di attenuazione determinato dall'inserito usato, sono soggetti ad un irraggiamento non costante durante le misure e ciò determina una differenza della loro temperatura che altera il valore misurato della fotocorrente, e quindi della potenza incidente ricavata a partire da essa, se non si operano le correzioni alla fotocorrente per effetto della temperatura. Per assicurare quindi una maggiore stabilità e precisione di misura, è indispensabile realizzare un sistema di termoregolazione dei fotorivelatori, ad esempio con un sistema Peltier. Questo accorgimento è ancora più necessario quando si lavori all'aperto, in condizioni di forti escursioni termiche.

Il radiometro descritto non è limitato necessariamente a due cavità, ma può essere costituito da più cavità che permettono una maggiore attenuazione dell'intensità della luce incidente. Il radiometro quindi opera l'attenuazione del fascio concentrato per interposizione di una serie di cavità integratrici successive, poste una in serie all'altra, tra l'ingresso del fascio e l'uscita ai fotorivelatori. L'uso di almeno due cavità è dettato dalla necessità di operare una attenuazione controllata della radiazione attraverso gli inserti ad apertura variabile, inseriti in una fenditura interposta tra le sfere. L'uso di una singola cavità integrante avrebbe sì l'effetto di attenuare la radiazione incidente, ma di un fattore più basso, ed inoltre il fattore di attenuazione non potrebbe essere regolato adeguatamente, e soprattutto entro i limiti richiesti da uno strumento universale, progettato per la misura di intensità luminose estremamente variabili. Oltre a ciò, la necessità di regolare il fattore di attenuazione richiederebbe l'uso di schermi posti davanti al fotorivelatore e ciò comporterebbe un'interferenza con l'operazione d'integrazione della radiazione da parte della cavità.

3. DESCRIZIONE TECNICA DETTAGLIATA DEL RADIOMETRO DCR

3.1 Modellazione ottica e termica

Il radiometro descritto è stato realizzato sulla base della modellazione ottica di un sistema costituito da due sfere integratrici comunicanti, ciascuna delle quali realizza un'attenuazione in cascata della radiazione concentrata incidente, che complessivamente consentono la misura di questa radiazione con un radiometro a bassa intensità, utilizzando fotorivelatori convenzionali, e quindi già noto nella letteratura scientifica. La procedura di modellazione ha lo scopo di fornire l'entità dell'intensità della radiazione sui vari componenti del radiometro affacciati all'interno delle singole sfere.

Il primo modello ottico di radiometro considerato è costituito da una coppia di sfere integratrici collegate otticamente da una finestra (fco) con apertura variabile e nota (vedi Fig. 5). Questo primo modello detta le caratteristiche generali di funzionamento di un radiometro a due sfere integratrici accoppiate, ovvero di un radiometro DCR, e prevede un numero indeterminato di finestre al suo interno, alle quali si possono affacciare fotorivelatori e altri misuratori ottici in generale. Il modello generale potrà essere poi specializzato per un particolare tipo di radiometro per il quale siano state decise dimensioni delle due cavità, numero e dimensioni delle finestre affacciate a ciascuna di esse, riflettività delle pareti e dei fotorivelatori impiegati. Il modello può essere esteso con facilità al caso di un radiometro con più di due sfere accoppiate in serie.

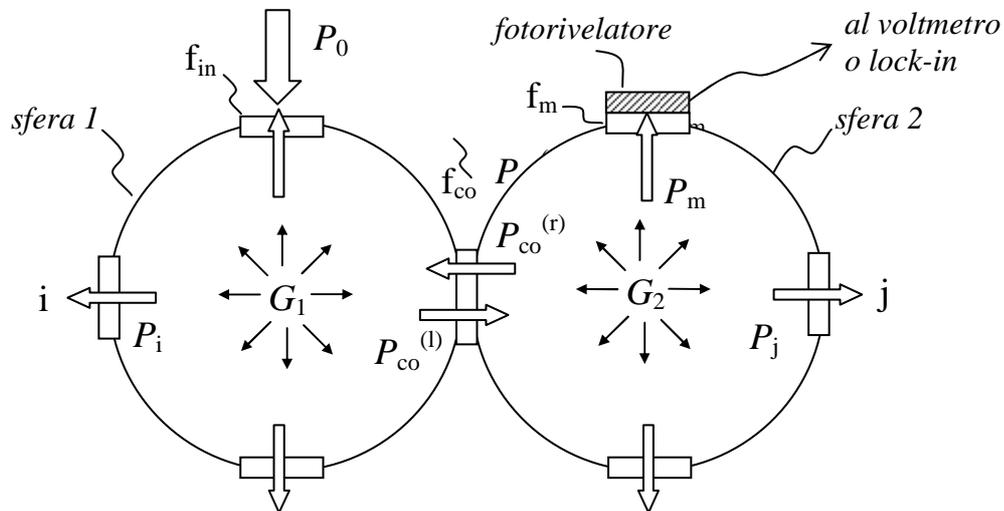


Figura 5. Modello generale di radiometro a due sfere integratrici accoppiate. G_1 irradianza nella prima cavità; G_2 irradianza nella seconda cavità; (i) indice delle porte nella prima cavità; (j) indice delle porte nella seconda cavità; (f_m) finestra di misura per il fotorivelatore.

Le sfere di Fig. 5 sono poste per semplicità di uguali dimensioni e sono provviste di porte o finestre con riflettanza nota. Tra queste, abbiamo la porta “in” d’ingresso del fascio concentrato nella sfera 1, la porta “co” d’accoppiamento tra le due sfere, e la porta “m” di misura della radiazione nella sfera 2, mentre “i” è la porta generica della sfera 1, e “j” è quella generica della sfera 2.

Applichiamo ora il teorema della conservazione del flusso radiante, ovvero dell’energia che fluisce nella sfera 1 o nella sfera 2, eguagliando la potenza (flusso) in ingresso alla somma delle potenze in uscita. Queste ultime comprendono sia le potenze in uscita dalle porte aperte ($R=0$), che il calore dissipato dalle porte chiuse e dalla parete interna della sfera.

$$P_0 + P_{co}^{(r)} = \sum_{i=1}^{N1} P_i + P_{p1} \quad (1')$$

$$P_0 + G_2 \cdot S_{co} = \sum_{i=1}^{N1} G_1 \cdot S_i \cdot (1 - R_i) + G_1 \cdot S_{p1} \cdot (1 - R_{p1}) \quad (2')$$

Analogamente avremo per la sfera 2:

$$P_{co}^{(l)} = \sum_{j=1}^{N2} P_j + P_{p2} \quad (1'')$$

$$G_1 \cdot S_{co} = \sum_{j=1}^{N2} G_2 \cdot S_j \cdot (1 - R_j) + G_2 \cdot S_{p2} \cdot (1 - R_{p2}) \quad (2'')$$

dove:

P_0 = potenza del fascio in ingresso alla sfera 1;

P_i = potenza in uscita dalla porta i-ma (sfera 1);

P_j = potenza in uscita dalla porta j-ma (sfera 2);

$P_{co}^{(r)}$ = potenza in ingresso alla sfera 1 dalla porta f_{co} (da destra);

$P_{co}^{(l)}$ = potenza in ingresso alla sfera 2 dalla porta f_{co} (da sinistra);

P_{p1} = potenza dissipata sulla parete interna della sfera 1;

P_{p2} = potenza dissipata sulla parete interna della sfera 2;

G_1 = irradianza all'interno della sfera 1;

G_2 = irradianza all'interno della sfera 2;

S_i = area della porta i-ma (sfera 1);

R_i = riflettanza della porta i-ma (sfera 1);

S_{co} = area dell'apertura tra le due sfere;

S_j = area della porta j-ma (sfera 2);

R_j = riflettanza della porta j-ma (sfera 2);

R_{p1} = riflettività della parete della sfera 1;

R_{p2} = riflettività della parete della sfera 2;

N_1 = numero di porte della sfera 1;

N_2 = numero di porte della sfera 2.

Le equazioni precedenti presuppongono l'integrazione spaziale della radiazione all'interno delle due sfere, e questo è raggiunto quando la superficie complessiva delle aperture all'interno di una sfera non supera il 5% della sua superficie totale [11-13].

Dalle Eq.ni (1'), (2'), (1''), (2'') si ricavano, dopo alcuni passaggi, le espressioni per le irradianze all'interno delle due sfere:

$$G_1 = \frac{P_0 \cdot [\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2})]}{[\sum_{i=1}^{N1} S_i \cdot (1 - R_i) + S_{p1} \cdot (1 - R_{p1})] \cdot [\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2})] - S_{co}^2} \quad (3')$$

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{S_{co}}{[\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2})]} \quad (3'')$$

e da queste il loro rapporto:

$$G_1 / G_2 = \frac{[\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2})]}{S_{co}} \quad (4)$$

Dall'Eq. (4) si trova naturalmente che $G_1 > G_2$ e inoltre che le due grandezze stanno in rapporto tra di loro come la totalità delle aree assorbenti della sfera 2 (porte e parete), pesate secondo le loro rispettive assorbanze, $A_j = (1 - R_j)$, stanno rispetto all'area della porta di accoppiamento (f_{co}).

Nella Eq. (3') la potenza d'ingresso P_0 può essere espressa come:

$$P_0 = G_0 \cdot S_{in} \quad (5)$$

dove:

G_0 = irradianza media del fascio in ingresso alla sfera 1;

S_{in} = area della porta d'ingresso.

La potenza luminosa incidente sul fotorivelatore "m", di area S_m , sarà allora data da:

$$P_m = G_2 \cdot S_m \quad (6)$$

$$P_m = G_1 \cdot \frac{S_{co}}{\left[\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2}) \right]} \cdot S_m \quad (6')$$

$$P_m = \frac{G_0 \cdot S_{in} \cdot S_{co} \cdot S_m}{\left[\sum_{i=1}^{N1} S_i \cdot (1 - R_i) + S_{p1} \cdot (1 - R_{p1}) \right] \cdot \left[\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2}) \right] - S_{co}^2} \quad (6'')$$

Dalle Eq.ni (3'), (3'') e (5) si ottengono i fattori di attenuazione f_1, f_2 e f_A :

$$f_1 = G_0 / G_1 = \dots$$

$$\dots = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N1} S_i \cdot (1 - R_i) + S_{p1} \cdot (1 - R_{p1}) \right] \cdot \left[\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2}) \right] - S_{co}^2}{S_{in} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2}) \right]} \quad (7)$$

$$f_2 = G_1 / G_2 = \frac{\left[\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2}) \right]}{S_{co}} \quad (4)$$

$$f_A = G_0 / G_2 = f_1 \cdot f_2 = \dots$$

$$\dots = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N1} S_i \cdot (1 - R_i) + S_{p1} \cdot (1 - R_{p1}) \right] \cdot \left[\sum_{j=1}^{N2} S_j \cdot (1 - R_j) + S_{p2} \cdot (1 - R_{p2}) \right] - S_{co}^2}{S_{in} \cdot S_{co}} \quad (8)$$

Il fattore di attenuazione dato dall'Eq.ne (8) esprime il rapporto tra irradianza d'ingresso e irradianza all'interno della seconda sfera. Dall'Eq.ne (8) si trova, come aspettato, che il fattore di attenuazione f_A aumenta al diminuire della superficie della finestra d'ingresso, S_{in} , e dell'apertura tra le due cavità, S_{co} , e all'aumentare dell'assorbimento della luce nelle due sfere, sia sulle varie finestre che sulle pareti interne (termini tra parentesi quadre). Il fattore di attenuazione può quindi essere controllato, oltre che dai parametri S_{in} e S_{co} , anche attraverso la scelta della riflettività della parete delle sfere. Operare però con la riflettività delle pareti troppo basse rispetto all'unità comporta un surriscaldamento del corpo del radiometro e quindi non è consigliabile. Il modo più conveniente di lavorare è quello di impiegare pareti molto riflettenti ($R \approx 98-99\%$ entro l'intervallo Vis-NIR) e di regolare il fattore di attenuazione f_A , intervenendo soltanto sui parametri S_{in} e S_{co} nel caso in cui si misuri un profilo d'intensità, o solo sul parametro S_{co} nel caso in cui si misuri la potenza totale del fascio.

Modelliamo ora il radiometro di Fig. 5 finalizzandolo alla misura della potenza totale incidente su una cella a concentrazione SunPower HECO252 [9], diffusamente impiegata nei sistemi a concentrazione fotovoltaica. La finestra d'ingresso del radiometro sarà posta allora di forma quadrata e di area identica all'area attiva della cella SunPower, 1.21 cm^2 , o maggiore qualora il fascio sia contenuto tutto all'interno dell'area attiva, in modo da raccogliere tutta e soltanto la radiazione che avrebbe inciso sulla cella. La finestra d'ingresso della sfera 1 può essere modificata montando sulla parte frontale del radiometro una piastra, ricoperta di BaSO_4 su una faccia, provvista di un foro della forma e dimensioni opportune. Come fotorivelatore da posizionare nella seconda sfera è usata ancora una cella a concentrazione SunPower HECO252. Nella seconda cavità includiamo anche la fibra ottica che collega il radiometro allo spettrometro. Impostiamo quindi i seguenti parametri nel modello ottico del radiometro:

- * diametro delle due sfere: $d = 5 \text{ cm}$;
- * area della finestra d'ingresso: $S_{in} = 1.1 \cdot 1.1 = 1.21 \text{ cm}^2$;
- * area della finestra del fotorivelatore: $S_m = 1.5 \cdot 1.5 = 2.25 \text{ cm}^2$.
- * area della finestra della fibra: $S_{fo} = 0.196 \text{ cm}^2$.

Le grandezze variabili sono:

- * superficie della porta intermedia: $S_{co} = 0.1-2.0 \text{ cm}^2$;
- * comune riflettività della parete interna delle due sfere: $R_p = 0.92-0.99 \%$.

Impostiamo ora il modello ottico considerando tutte quelle parti affacciate all'interno delle cavità che contribuiscono in maniera non trascurabile all'assorbimento della luce.

Tabella 1. Caratteristiche dimensionali ed ottiche di alcuni componenti del radiometro.

Assorbitore	Superficie (mm ²)	Emissività [7]	Riflettanza (%)
Cella SP: regione centrale	$S_{m1} = 156$	–	$R_{m1} = 4$
Cella SP: cornice di rame	$S_{m2} = 69$	Copper scraped 0.07	$R_{m2} = 93$
Fibra ottica: finestra di vetro	$S_{fo1} = 7.1$	–	$R_{fo1} = 4$
Fibra ottica: rivestimento di acciaio	$S_{fo2} = 12.5$	Stainless steel Sheet polished 0.16	$R_{fo2} = 84$

La cella SunPower (SP) è caratterizzata da una zona centrale molto assorbente e da una cornice di rame, una parte della quale è visibile dall'interno della seconda cavità (vedi Fig. 6a), mentre la fibra ottica è caratterizzata da una finestra in vetro e da una cornice in acciaio lucidato, entrambe visibili dall'interno della seconda cavità (vedi Fig. 6b). I dati di superficie e di riflettività delle singole parti considerate nel modello ottico sono riportate in Tab. 1. I valori di riflettività sono stati dedotti da quelli di emissività ricavati dal riferimento [14].

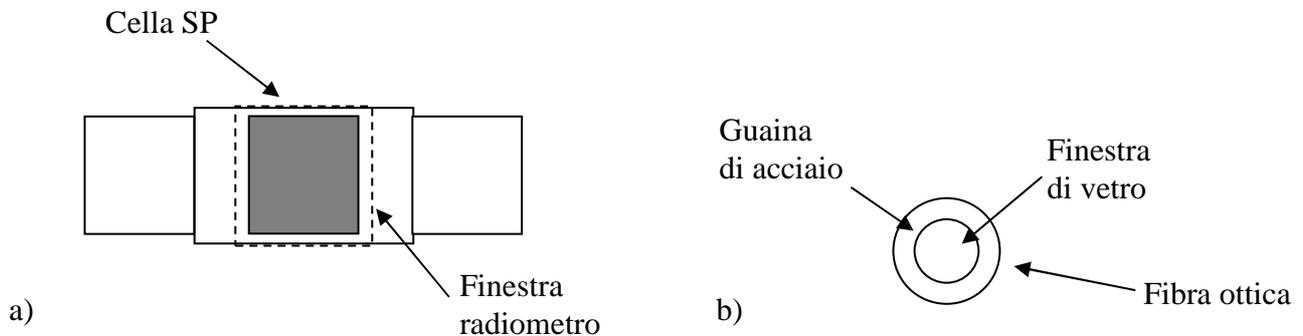


Figura 6. Disegno schematico della cella solare SunPower HECO252 (a) e della fibra ottica (b).

Per questa configurazione del radiometro, dall'Eq.ne (6'') si ricava quanto segue per la potenza incidente sul fotorivelatore:

$$P_m = \frac{G_0 \cdot S_{in} \cdot S_{co} \cdot S_m}{\sum_1 \cdot \sum_2 - S_{co}^2} \quad (9)$$

e per il fattore di attenuazione globale $f_A = f_1 \cdot f_2 = G_0 / G_m$:

$$f_A = P_0 / P_m = S_{in} \cdot G_0 / S_m \cdot G_2 = \dots$$

$$\dots = \frac{\sum_1 \cdot \sum_2 - S_{co}^2}{S_m \cdot S_{co}} \quad (8')$$

dove:

$$\sum_1 = [S_{in} + S_{co} + S_{p1} \cdot (1 - R_p)]$$

$$\sum_2 = [S_{m1} \cdot (1 - R_{m1}) + S_{m2} \cdot (1 - R_{m2}) + S_{fo1} \cdot (1 - R_{fo1}) + S_{fo2} \cdot (1 - R_{fo2}) + S_{co} + S_{p2} \cdot (1 - R_p)]$$

Le nuove grandezze introdotte nelle Eq. (9) e (8'), S_{m1} , R_{m1} , S_{m2} , R_{m2} , S_{fo1} , R_{fo1} , S_{fo2} , R_{fo2} , sono definite nella Tab.1.

Il fattore di attenuazione della potenza, f_A , calcolato dall'Eq.ne (8'), è riportato in Fig. 7 in funzione dell'area S_{co} della porta intermedia, per diversi valori della riflettività di parete R_p . Operando con una parete ad alta riflettività ($R_p \sim 0.98-0.99$), dal grafico di Fig. 7 si deduce che è possibile regolare il fattore di attenuazione f_A tra ~ 5 e ~ 50 operando soltanto sulla porta di separazione tra le due sfere.

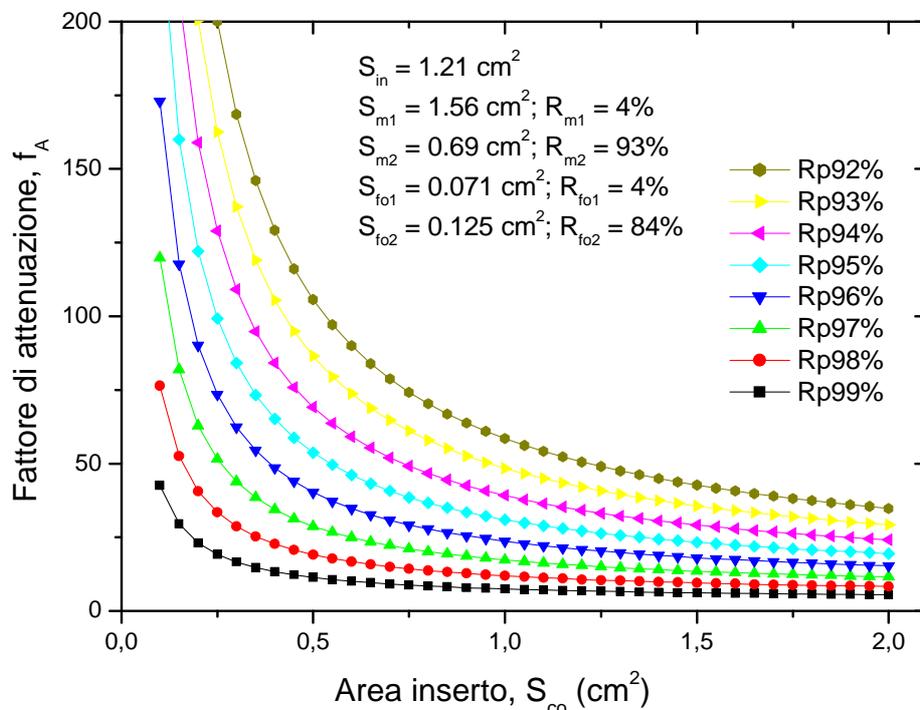


Figura 7. Fattore di attenuazione f_A della potenza del radiometro DCR calcolato in funzione dell'area della porta (fco), S_{co} , per diversi valori della riflettanza di parete delle due cavità, R_p .

Considerando che celle del tipo SunPower HECO252 lavorano a concentrazioni dell'ordine di 100-200 *sol*, si deduce che è possibile, impostando il radiometro DCR con $S_c \sim 0.1 \text{ cm}^2$, $f_A \sim 50$, operare sul fotorivelatore con livelli di concentrazione di $\sim 2-4 \text{ sol}$, corrispondenti ad una potenza incidente totale $P_m = S_m \cdot G_m = 1.21 \text{ cm}^2 \cdot (2-4) \cdot 0.1 \text{ W/cm}^2 \sim 0.2-0.5 \text{ W}$.

Dalla Fig. 7 si vede inoltre come l'aumento della riflettività della parete comporti, a parità degli altri parametri, un aumento del fattore di attenuazione che è molto rilevante riducendo anche solo di poche unità la riflettività percentuale della parete. Come già detto, però, l'uso di pareti non altamente riflettenti comporta un surriscaldamento non trascurabile di esse e quindi un problema di smaltimento del calore.

Calcoliamo ora con precisione la potenza che deve essere dissipata, sotto forma di calore, dal fotorivelatore SunPower nelle varie condizioni d'irraggiamento e per le varie configurazioni del radiometro. Essa è pari alla potenza totale incidente, P_m , sottratta della potenza riflessa dalla cella e della potenza elettrica erogata:

$$Q_m = P_m - P_m \cdot R_m - P_m \cdot \eta(C_m) = P_m [1 - R_m - \eta(C_m)] \quad (10)$$

dove $\eta(C_m)$ è l'efficienza della cella SP, funzione della concentrazione C_m , e R_m è la sua riflettanza. Il calore da dissipare sul fotorivelatore, Q_m , in funzione del livello di concentrazione C_{in} , espresso in soli (dove: 1 *sole* = 100 mW/cm²), della radiazione incidente all'ingresso del radiometro, per diversi valori di S_{co} è allora dato da:

$$Q_m = \frac{S_m \cdot 0.1 \cdot C_{in} \cdot S_{in} \cdot S_{co} \cdot [1 - R_m - \eta(C_m)]}{\sum_1 \cdot \sum_2 - S_{co}^2} \quad (11)$$

dove abbiamo posto:

$$G_0 (\text{W} / \text{cm}^2) = C_{in} (\text{sol}) / 10 \quad (12)$$

C_m è la concentrazione della radiazione sulla cella SunPower montata sul radiometro, ed è data da:

$$C_m (\text{sol}) = G_m (\text{W} / \text{cm}^2) \cdot 10 = C_{in} (\text{sol}) / f_A = \frac{C_{in} \cdot S_{in} \cdot S_{co}}{\sum_1 \cdot \sum_2 - S_{co}^2} \quad (13)$$

L'efficienza di conversione della cella SP HECO252 non è costante con l'irraggiamento, ma presenta un andamento crescente a partire da 1 *sole*, dove è $\eta \sim 20\%$ e raggiunge rapidamente valori di $\eta \sim 25\%$ tra 50 e 200 *sol*. La Fig. 8 mostra i dati sperimentali di efficienza, misurati a $T=25^\circ\text{C}$ con il simulatore solare impulsato PASAN, e riportati in funzione della I_{sc} . La corrente I_{sc} è lineare con l'intensità dell'irraggiamento, come è mostrato in Fig. 9. In particolare, per celle SunPower HECO252 di medio-alte prestazioni, si ha mediamente, $I_{sc}(\text{A}) \sim C_m(\text{sol})/20 = G_m(\text{W}/\text{cm}^2)/2$. Un'espressione analitica di η vs. C_m , necessaria per il calcolo di Q_m attraverso l'Eq. (11), si ottiene esprimendo η vs. $\log(C_m)$ (vedi Fig. 10). Con una interpolazione polinomiale di secondo grado si ottiene, in particolare:

$$\eta(C_m) = 20.481 + 6.6063 \cdot \log C_m - 2.1524 \cdot (\log C_m)^2 \quad (14)$$

Mentre l'espressione analitica di η vs. I_{sc} è data da (vedi Fig. 8c):

$$\eta(I_{sc}) = 25.42 + 1.0724 \cdot \log I_{sc} - 2.1935 \cdot (\log I_{sc})^2 \quad (15)$$

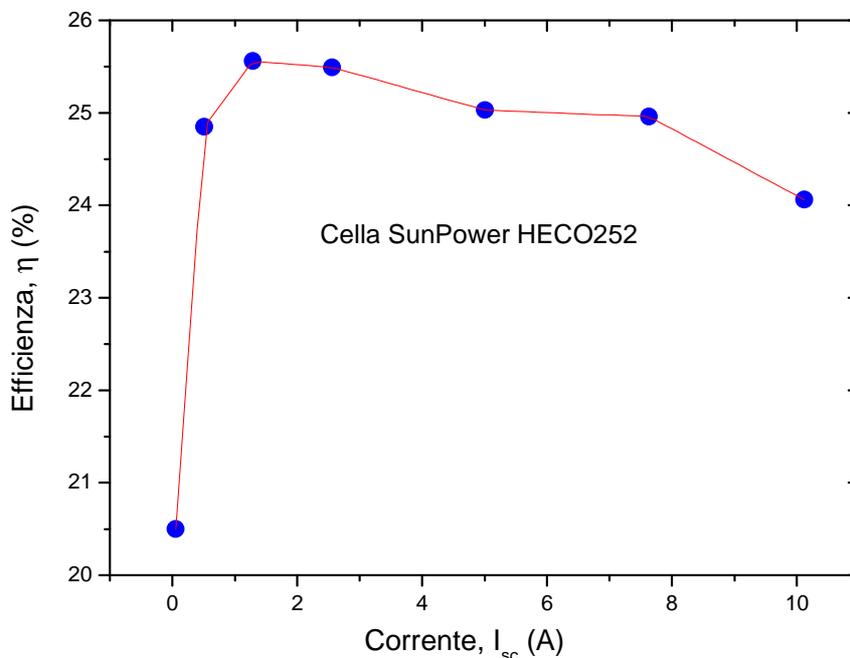


Figura 8. Efficienza della cella SP HECO252, misurata con il simulatore impulsato PASAN, riportata in funzione della corrente di corto circuito I_{sc} .

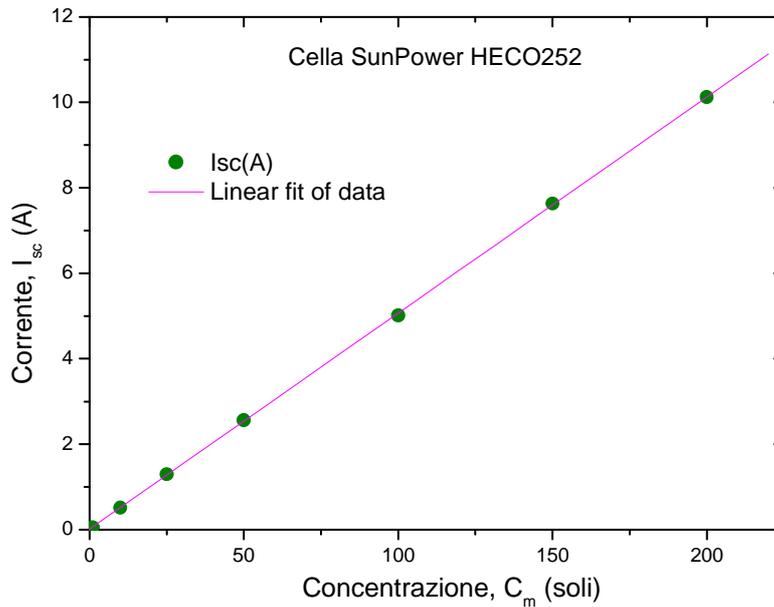


Figura 9. Corrente di corto circuito della cella SunPower HECO252, misurata con il simulatore PASAN, riportata in funzione della concentrazione della radiazione incidente, espressa in soli. I dati sperimentali seguono un andamento lineare con coefficiente di correlazione $R=0.99997$. Dal fit lineare si ottiene $I_{sc}(A) = C_m(soli)/19.77 = G_m(W/cm^2)/1.977$.

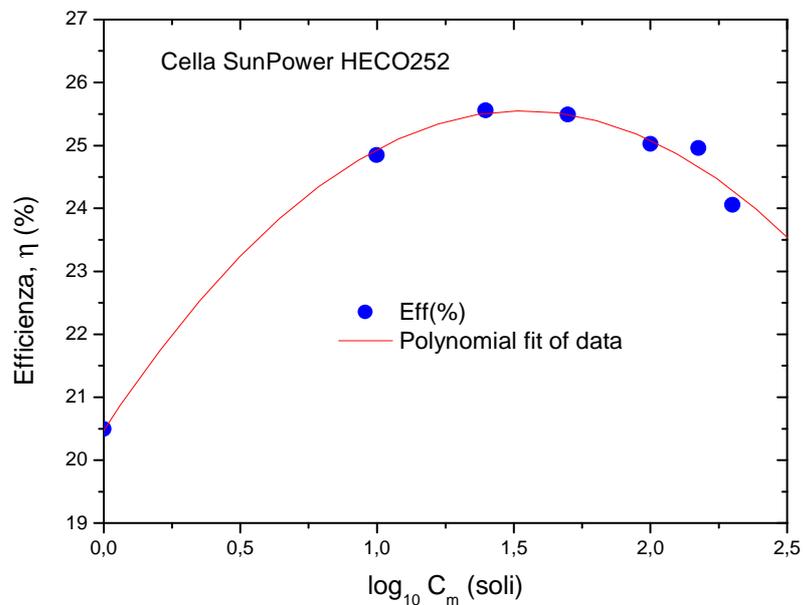


Figura 10. Efficienza della cella SP HECO252 in funzione del logaritmo della concentrazione. I punti sperimentali seguono un andamento polinomiale con coefficiente di correlazione $R=0.9919$.

Essendo che l'efficienza $\eta(C_m)$ della cella SunPower è funzione della concentrazione della radiazione presente nella seconda cavità, essa dipenderà sia dalla concentrazione della radiazione in ingresso C_{in} che dal fattore di attenuazione f_A del radiometro. La Fig. 11 mostra l'efficienza della cella SPHECO252, supposta montata all'interno del radiometro DCR, riportata in funzione del logaritmo della concentrazione della radiazione in ingresso al radiometro da 100 fino a 5000 soli, per diversi valori dell'apertura S_{co} , in cm^2 , dell'inserto (ins) posto tra le due cavità. Le curve di Fig. 11 sono state volutamente interrotte per valori di C_m di ~ 200 soli, corrispondenti a $G_m \sim 20 \text{ W/cm}^2$, il massimo imposto per le celle SP HECO252,

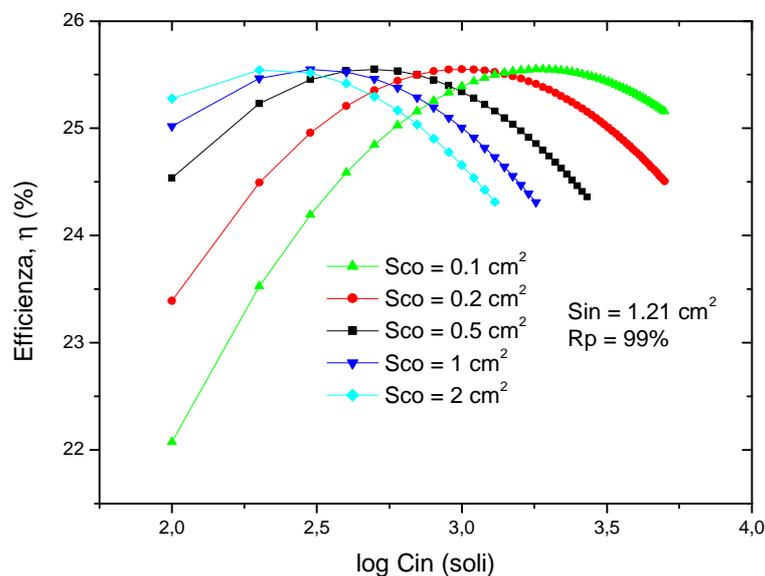
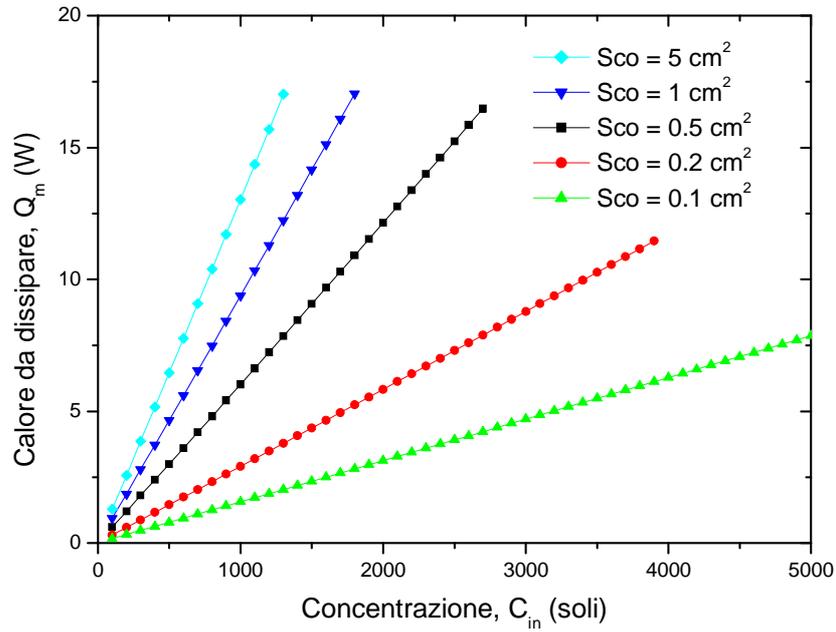
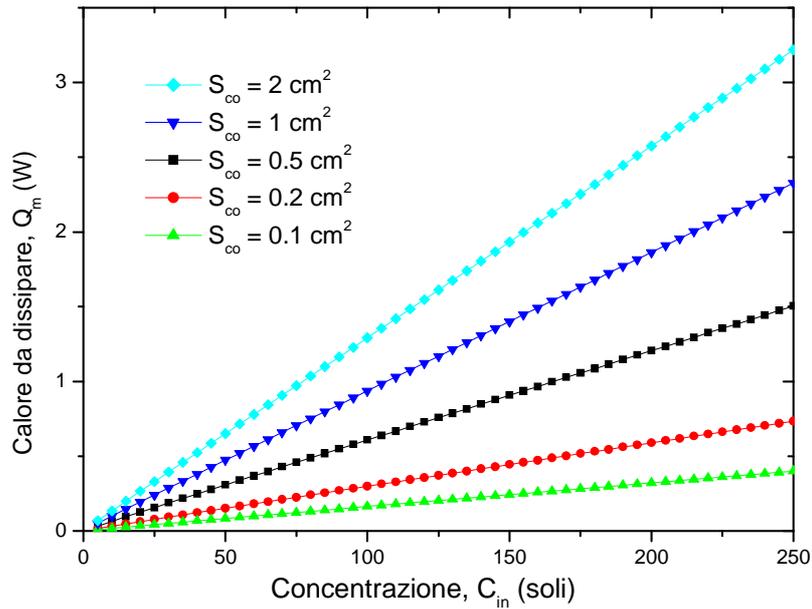


Figura 11. Efficienza della cella SP HECO252 riportata in funzione della concentrazione della radiazione in ingresso al radiometro da 100 a 5000 soli, per diversi valori dell'apertura S_{co} , in cm^2 .

I risultati di Q_m ottenuti fissando una riflettanza di parete del 99%, che è il valore più alto raggiungibile in pratica nella regione del Vis-NIR, sia con rivestimenti tradizionali di BaSO_4 che con rivestimenti più sofisticati, quali lo Spectralon® o lo Spectraflex® della Labsphere [1], sono mostrati in Fig. 12a in funzione di C_{in} (soli) e dell'area dell'inserto. Si vede come il calore da dissipare, Q_{out} , può essere limitato a $\sim 8 \text{ W}$ anche per valori di C_{in} elevati fino a ~ 5000 soli, se si riduce al massimo il valore di S_{co} (0.1 cm^2). Come per la Fig. 11, le curve di Fig. 12a sono state volutamente interrotte per valori di C_m di ~ 200 soli, il massimo imposto per le celle SP HECO252, di conseguenza, valori decrescenti di S_{co} portano ad una espansione via via crescente dell'intervallo di operatività del radiometro in termini di C_{in} .



a)



b)

Figura 12. a) Calore da dissipare sulla cella SunPower HECO252 per effetto dell'esposizione del radiometro a vari livelli d'irraggiamento, espressi in soli, tra 1 e 5000, calcolato per diversi valori dell'apertura S_{co} , in cm^2 , dell'inserto (ins). b) Stesso grafico di a), riportato per livelli d'irraggiamento compresi tra 1 e 250 soli.

In Fig. 12b è riportato un diagramma simile, più dettagliato per bassi valori di C_{in} (*solli*). Dalla Fig. 12b si vede che il calore dissipato sul fotorivelatore può essere contenuto entro ~ 3 W per concentrazioni comprese tra 1 e 200 soli e per tutti i tipi di inserto, e quindi può essere smaltito efficacemente attraverso un sistema Peltier operante con una ventola di raffreddamento. La prevalente linearità delle curve di Fig. 12 dipende essenzialmente dal termine C_{in} nella Eq. (11), essendo che il termine non lineare $\eta(C_m)$ ha un trascurabile effetto.

3.2 Realizzazione pratica

Presentiamo ora il progetto concreto della versione preferita del radiometro DCR, realizzato dalla Ditta ECOVIDE (Formello, RM). Il radiometro può essere usato sia per la misura della potenza totale del fascio incidente, che per la misura generica del profilo d'irraggiamento, misure entrambe modellate precedentemente. La differenza tra le due misure consisterà semplicemente nello scegliere la finestra d'ingresso più opportuna. Nel seguito faremo riferimento alla configurazione del radiometro adatta alla misura della potenza totale incidente su una cella SunPower HECO252. A tale scopo, la finestra d'ingresso della radiazione è stata posta esattamente uguale all'area attiva della cella, ovvero $S_{in}=1.21$ cm². La versione preferita del radiometro DCR è costituita da due sfere di uguali dimensioni, di una finestra d'ingresso, di una finestra di uscita per il fotorivelatore, di una finestra di uscita per lo spettrometro e di una porta con apertura variabile interposta tra le due sfere.

La base del radiometro è costituita da un prisma entro il quale sono realizzate le due cavità sferiche. Esso è dettagliatamente mostrato nelle Figg. 13 e 14.

Le due sfere sono scavate dentro un prisma di alluminio a base quadrata. La superficie esterna del prisma, in particolare quella superiore esposta alla radiazione concentrata, è stata lavorata per avere un'alta riflettività alla luce solare. La superficie interna è invece ricoperta di uno strato di BaSO₄ o materiali simili altamente riflettenti e diffondenti. Il radiometro è realizzato unendo due parti tagliate da una sezione orizzontale. Il radiometro, non rivestito, è stato dapprima lavorato per il successivo fissaggio degli accessori che dovranno essere montati su di esso (radiatori, cella solare, fibra ottica, ecc.).

Successivamente esso è stato completato con la deposizione del rivestimento bianco diffondente all'interno delle due cavità. La parte dell'inserto che si affaccia all'interno delle due sfere è ricoperta anch'essa con il rivestimento bianco diffondente.

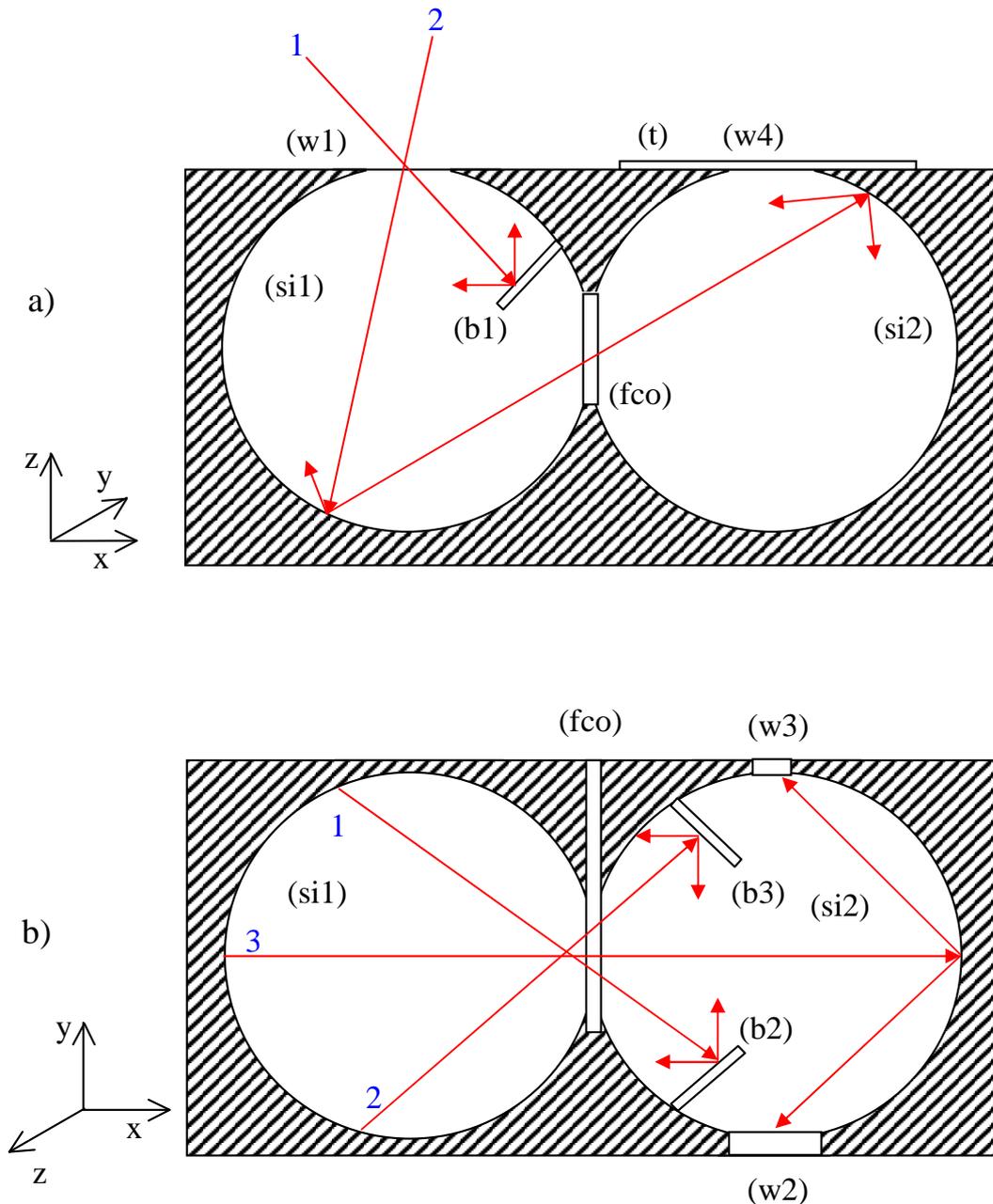


Figura 13. a) Vista laterale, ottenuta per sezione verticale del prisma, di un prototipo del radiometro a doppia cavità, DCR. E' mostrato come, per effetto della paletta (b1), la luce entrante in (w1) non passi direttamente nella seconda cavità (si2), ma soltanto dopo almeno una riflessione nella prima cavità (si1). b) Vista dall'alto, ottenuta per sezione orizzontale del prisma, del radiometro a doppia cavità, DCR. E' mostrato come, per effetto delle palette (b2) e (b3), la luce proveniente dalla prima cavità (si1) non possa raggiungere direttamente le finestre (w2) e (w3), rispettivamente, ma soltanto dopo almeno una riflessione nella seconda cavità (si2).

Simboli adottati nelle figure relative al radiometro:

(si1): cavità 1;

(si2): cavità 2;

(w1): finestra d'ingresso del fascio;

(w2): finestra per l'attacco della cella a concentrazione;

(w3): finestra per l'attacco della fibra ottica;

(w4): finestra supplementare;

(b1), (b2), (b3): "baffle" (paletta con disco di diametro ~12 mm);

(t): tappo (quadrato di lato 40 mm);

(ins): inserto;

(fco): apertura circolare variabile.

Le Figg. 13a e 13b mostrano la vista laterale in sezione verticale e la vista dall'alto in sezione orizzontale del radiometro, rispettivamente. Entrambe le sezioni passano per l'asse comune delle due sfere. Nelle Figg. 14a e 14b sono mostrate invece le viste esterne anteriori e posteriori del radiometro, rispettivamente. La sfera (si1) è provvista della finestra d'ingresso (w1) ed è separata dalla sfera (si2) da una porta di diametro variabile che si imposta inserendo, attraverso la fenditura (f), un inserto provvisto di un'apertura del diametro desiderato (vedi Fig. 14c). L'inserto (ins) è realizzato in modo tale da avere, attorno al foro di apertura della porta una corona circolare di diametro esterno costante e uguale al diametro dell'apertura massima tra le due cavità, che è rivestita di materiale bianco diffondente e fa sì che, dopo l'inserimento in (fco) dell'inserto (ins) le pareti interne delle due cavità siano completamente bianche. La radiazione presente in (si2) è misurata in (w2) dal fotorivelatore costituito dalla cella SunPower HECO252. L'uso di una cella a concentrazione come fotorivelatore permette di misurare valori estremamente elevati di potenza incidente all'ingresso del radiometro, come è stato ampiamente discusso precedentemente.

La sfera (si2) è anche provvista di un attacco per fibra ottica (w3), che consente di collegare il radiometro ad uno spettrometro o spettroradiometro, e di misurare così lo spettro della radiazione incidente. Il radiometro è anche provvisto in (si2) di una porta supplementare (w4), momentaneamente resa cieca con il tappo (t). Per consentire la corretta funzionalità delle sfere, sono stati inseriti alcune palette o dischi separatori ("baffle") all'interno di esse (vedi Figg. 13a e 13b). La paletta (b1) impedisce che un raggio in ingresso a (w1) (raggio 1) raggiunga direttamente la sfera (s2), se non attraverso almeno una riflessione sulla parete di (si1) (raggio 2). La paletta (b2) impedisce che la prima riflessione, molto intensa, del fascio nella parte inferiore della sfera (si1) raggiunga direttamente il fotorivelatore in (w2) (raggio 1).

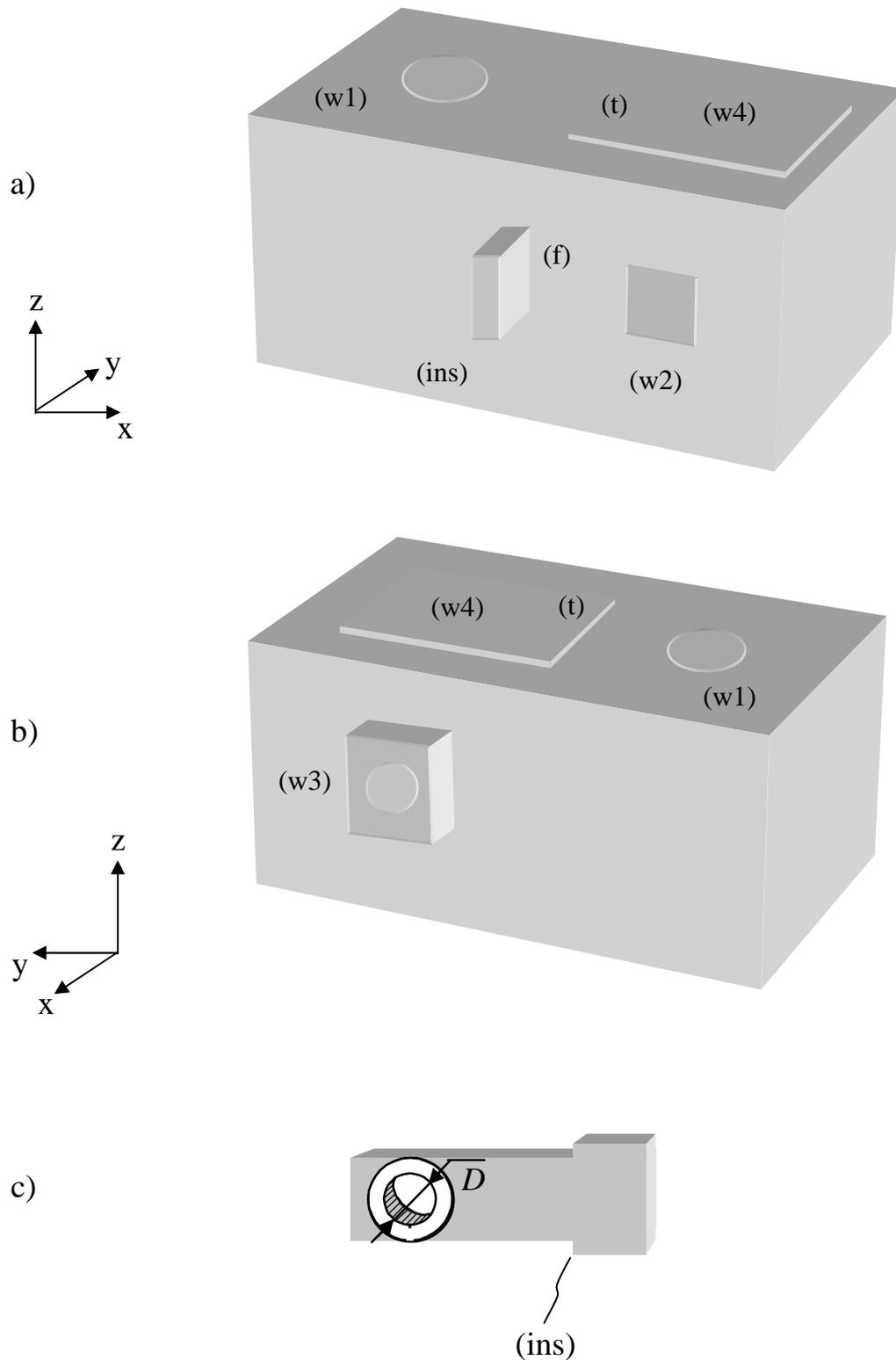


Figura 14. a) Vista prospettica della parte anteriore del radiometro DCR privo di accessori. b) Vista prospettica della parte posteriore del radiometro DCR privo di accessori. c) Inserto (ins) con apertura di separazione tra le due sfere di diametro D variabile.

La stessa funzione ha la paletta (b3) nei confronti della fibra ottica collegata in (w3) (raggio 2). In entrambi i casi i fotorivelatori misureranno soltanto la radiazione che ha compiuto almeno una riflessione nella cavità (si2) (raggio 3).

Il corpo del radiometro o radiometro “di base”, mostrato sinora, è, a parte la presenza delle palette, la realizzazione concreta del modello ottico sviluppato e quindi possiede tutti i requisiti per funzionare secondo quel modello. Le parti principali del radiometro di base, così come realizzato dalla Ditta ECOVIDE prima del rivestimento bianco diffusivo, sono mostrate in dettaglio nelle foto riportate in Fig. 15. In Fig. 15a è mostrato il prisma aperto e non ancora rivestito, insieme agli inserti (ins). In Fig. 15b è mostrato il prisma aperto e l’inserto (ins) inserito nella fenditura (f), e la fibra ottica collegata al blocchetto che va fissato sulla finestra (w3). La Fig. 15c mostra il prisma chiuso. Si notano superiormente la finestra (w1) predisposta per le misure di profilo e la finestra (w4) supplementare, e di lato a destra la finestra quadrata (w2) per l’innesto della cella SunPower. Al modello di base vanno poi aggiunte le parti che lo rendono funzionale sia dal punto di vista elettrico, ovvero di misura della radiazione, che da punto di vista termico, ovvero di smaltimento del calore prodotto dall’irraggiamento (vedi Figg. 16 e 17). Per prima cosa è utile corredare la faccia superiore del radiometro, quella esposta alla radiazione concentrata, con una lastra metallica ad alta riflettività (pa), separata dal prisma (ra) da un’intercapedine d’aria sottile pochi millimetri. La lastra metallica, o schermo frontale (pa), costituisce uno specchio per la radiazione incidente, soprattutto quando si tratti di caratterizzare un fascio concentrato di estensione superiore alla finestra d’ingresso. La lastra (pa) inoltre funziona come una barriera termica riducendo il calore trasmesso al prisma (ra) a causa della bassa conducibilità termica dello strato di aria che fa da intercapedine tra la parete ed il prisma. La lastra (pa) che funziona da schermo termico è realizzata con una finestra superiore (w0) che permette il passaggio della radiazione nella finestra d’ingresso (w1) del prisma (ra).

La lastra (pa) inoltre è realizzata con un’estensione sufficiente a riparare dalla radiazione incidente tutte le parti che si affacciano sulle pareti laterali del prisma. Le Figg. 14a e 14b mostrano uno schema del radiometro arredato con questa lastra. Se necessario, la lastra (pa) può essere facilmente rimossa agendo su poche viti di fissaggio. Oltre a ciò, il radiometro di base è corredato sulle tre pareti laterali esterne e sul fondo della prima cavità di radiatori alettati (rd) che facilitano lo smaltimento del calore prodotto nella prima sfera per effetto dell’irraggiamento. Anche i tre radiatori sono protetti dall’irraggiamento diretto del fascio dallo schermo superiore (pa) che si estende oltre il bordo superiore del prisma.

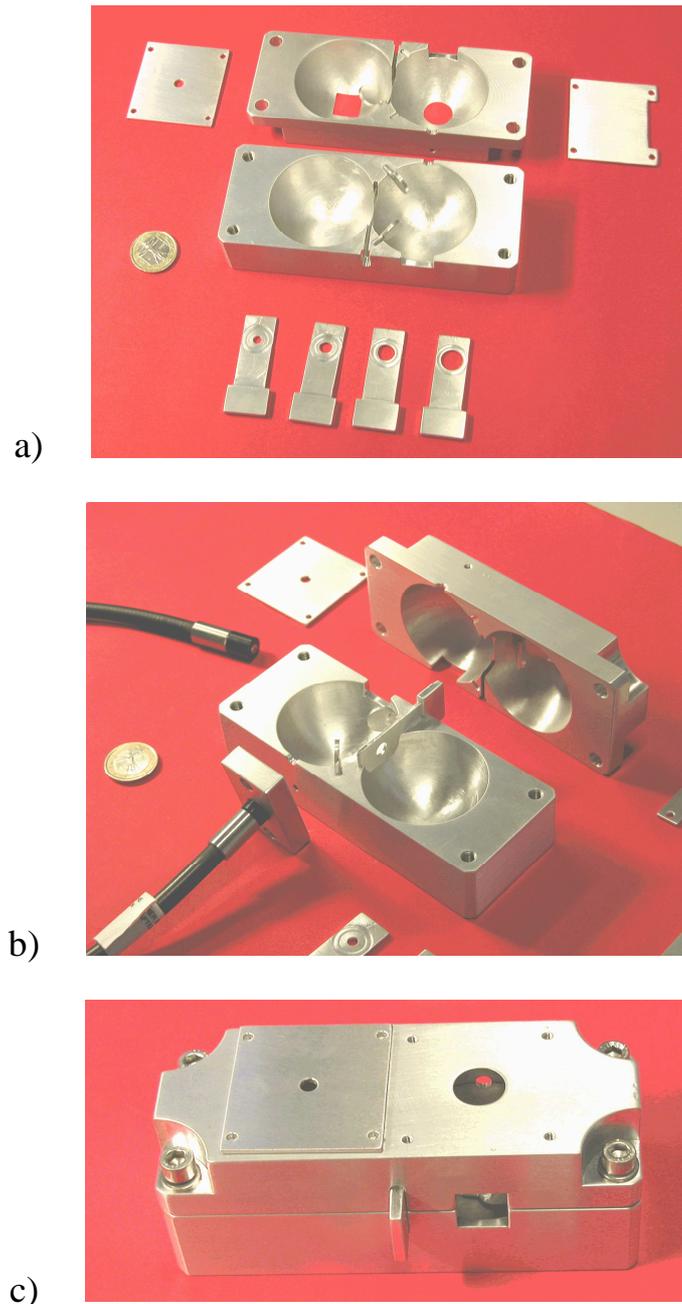


Figura 15. a) Foto delle due sezioni del radiometro DCR, prima del rivestimento delle pareti delle cavità, con visibili le tre palette (b1)-(b3) fissate all'interno delle cavità, dei tappi (t) per le finestre e della serie di inserti (ins) ad apertura variabile. b) E' mostrata la foto dello spaccato del radiometro DCR, prima del rivestimento delle pareti delle cavità, con l'inserto (ins) montato tra le due cavità e con la fibra ottica (fo) collegata al blocchetto di fissaggio alla porta (w3). c) E' mostrata la foto del prisma del radiometro DCR, chiuso e con l'inserto (ins) montato; si notano le aperture circolari superiori (w1) e (w4) e l'apertura quadrata (w2) per il fotorivelatore. Il prototipo mostrato è stato realizzato dalla Ditta ECOVIDE (Formello, RM).

Sulla seconda sfera, in corrispondenza del fotorivelatore, è posta la piastra del sistema di raffreddamento Peltier (P_e) che controlla la temperatura del fotorivelatore. La lettura della temperatura è fatta con un sensore a termoresistenza (t_r) inserito all'interno del blocco di raffreddamento, in prossimità del fotorivelatore, posteriormente ad esso. Anche il blocco del sistema di raffreddamento Peltier, compresa la ventola (v), è protetto dall'irraggiamento dalla parete schermante (p_a). La parete (p_a) protegge dall'irraggiamento anche l'attacco della fibra ottica (f_o) sulla finestra (w_3), posizionata in opposizione al sistema Peltier (vedi Fig. 14b). La Fig. 15 mostra le foto del radiometro DCR con annessi alcuni accessori. Lo schema completo del radiometro, comprensivo di tutta la strumentazione di misura, è riportato in Fig. 16. Una console esterna fa da centralina per i seguenti controlli: termoregolazione del fotorivelatore (cella SunPower) e misura della sua corrente di c.c.. La termoregolazione è fatta tipicamente entro un intervallo di temperatura di 5-40 °C. I limiti di temperatura possono essere modificati attraverso un controllo apposito. Il fotorivelatore è fatto funzionare tipicamente a $T_{amb}=25$ °C. La corrente di c.c. del fotorivelatore è proporzionale alla potenza radiante totale incidente su di esso. La sua misura deve quindi essere accurata e viene fatta caricando il fotorivelatore con una resistenza di "shunt", tipicamente di 0.01-0.1 Ω , posta nelle immediate vicinanze del fotorivelatore e misurando, con un voltmetro di precisione alloggiato all'interno della centralina, la caduta di tensione ai capi della resistenza. La corrente di c.c. del fotorivelatore è inoltre funzione della temperatura, e quindi il radiometro deve essere calibrato per il valore o per i valori di temperatura ai quali verrà fatto funzionare il fotorivelatore durante le misure. Il funzionamento della console, o centralina di controllo, è descritta nel seguito. La centralina DCR5000 della ECOVIDE è un sistema di controllo della temperatura del fotorivelatore e di misura della sua fotocorrente. Il controllore di temperatura utilizza una cella Peltier da 33 W controllata da un PID (Proportional, Integral, Derivative) attraverso un feedback di precisione a sua volta regolato da un PLC (Programmable Logic Controller) Siemens S224, con controllo tramite pannello operatore di tipo touchscreen.

Il pannello operatore ha una pagina di lavoro di funzionamento automatico per: i) l'impostazione della temperatura del fotorivelatore; ii) la lettura della temperatura del fotorivelatore; iii) l'impostazione della resistenza di shunt; iv) la lettura della tensione sulla resistenza di shunt; v) il calcolo del valore della fotocorrente. L'intervallo di lavoro della cella Peltier, tipicamente 5-40 °C, viene impostata all'interno del programma PLC. Il pannello operatore ha inoltre una pagina allarmi che segnala se la temperatura della cella Peltier esce dall'intervallo impostato. Lo schema elettrico generale della centralina DCR5000 è mostrato in Fig. 17.

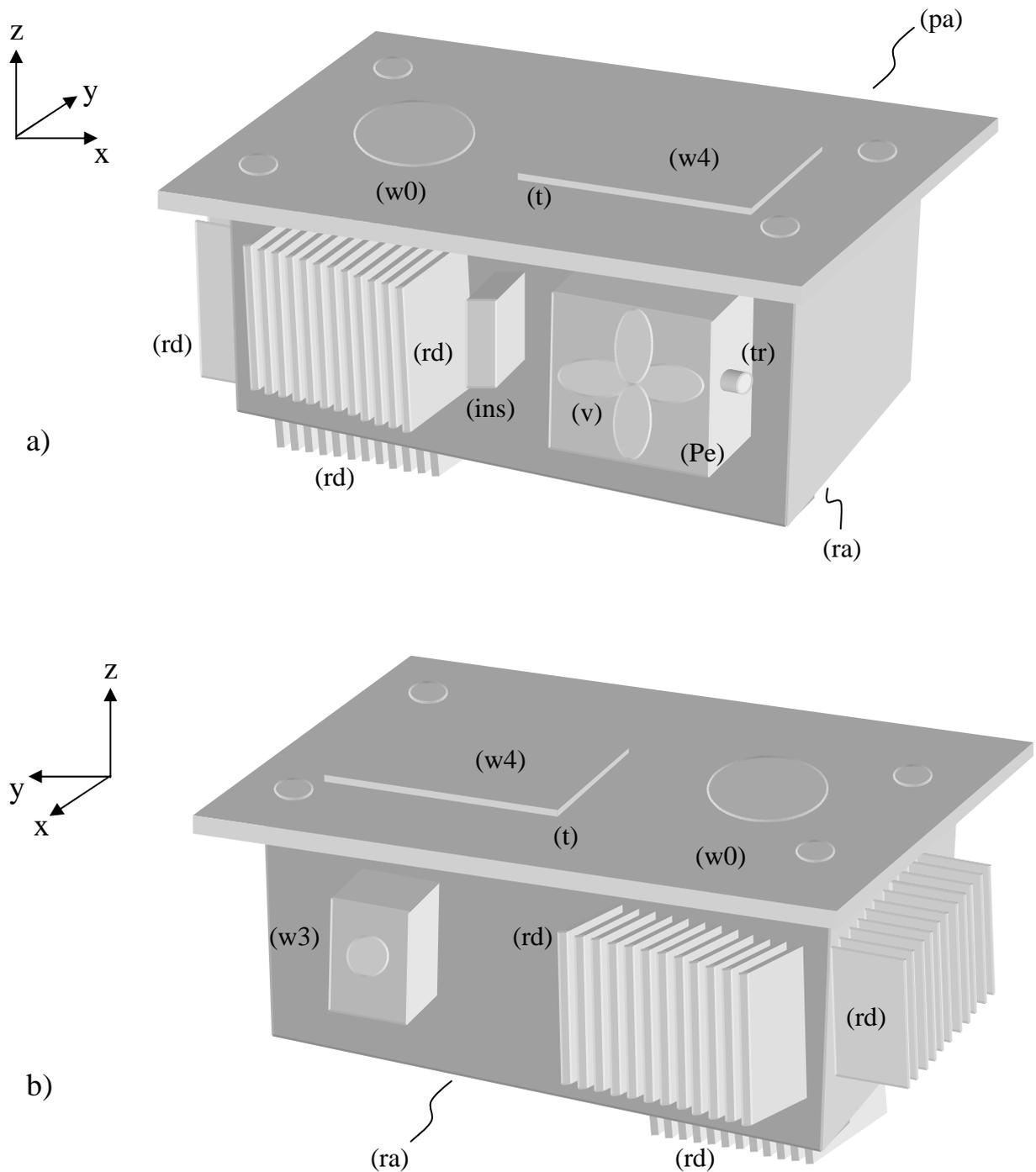
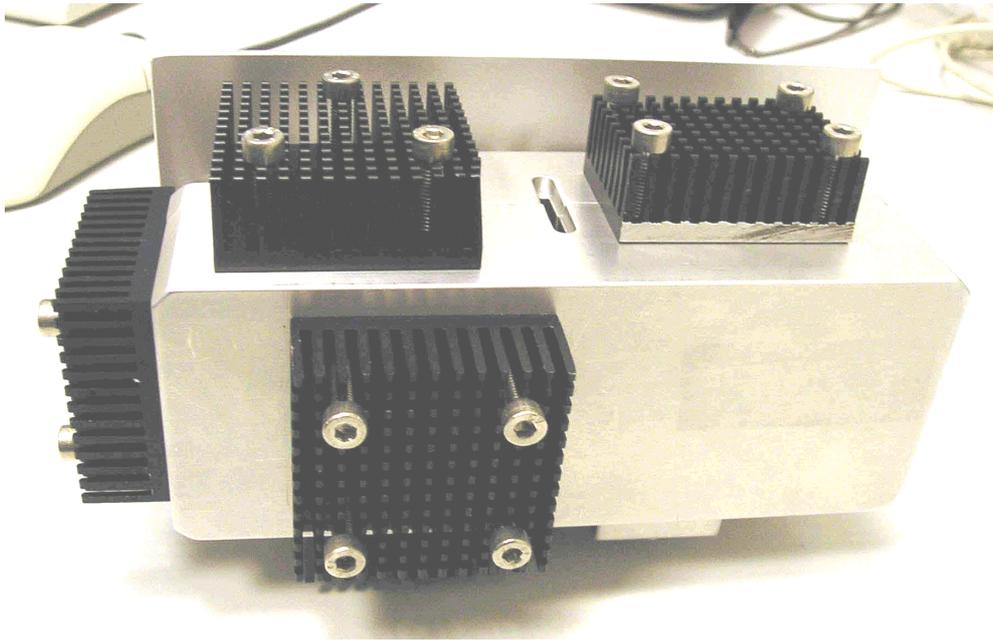
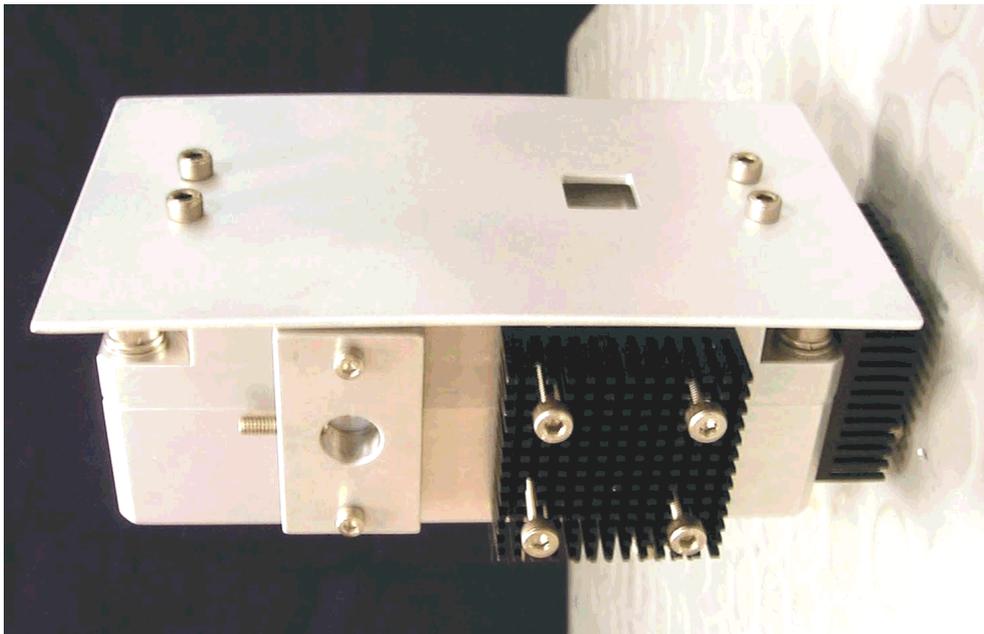


Figura 16. a) Vista prospettica della parte anteriore del radiometro DCR (ra), corredato degli accessori che servono a renderlo funzionale dal punto di vista elettrico e termico. (pa) schermo superiore; (rd) radiatore; (w0) finestra d'ingresso del fascio; (t) tappo; (w4) finestra supplementare; (ins) inserto; (v) ventola; (Pe) sistema di raffreddamento Peltier; (tr) termistore. b) Vista prospettica della parte posteriore del radiometro DCR (ra), corredato degli accessori. (w3) finestra per il collegamento della fibra ottica (fo) allo spettrometro (sp).



a)



b)

Figura 17. a) Foto del radiometro DCR. E' mostrata la parte frontale anteriore e la parte posteriore del radiometro; è visibile la fenditura per l'inserto (ins). b) Foto del radiometro DCR. E' mostrata la parte frontale posteriore e la parte superiore del radiometro; è visibile a sinistra l'attacco per la fibra ottica (fo) e sulla destra la finestra (w0) per il passaggio del fascio concentrato verso la finestra d'ingresso (w1) del radiometro.

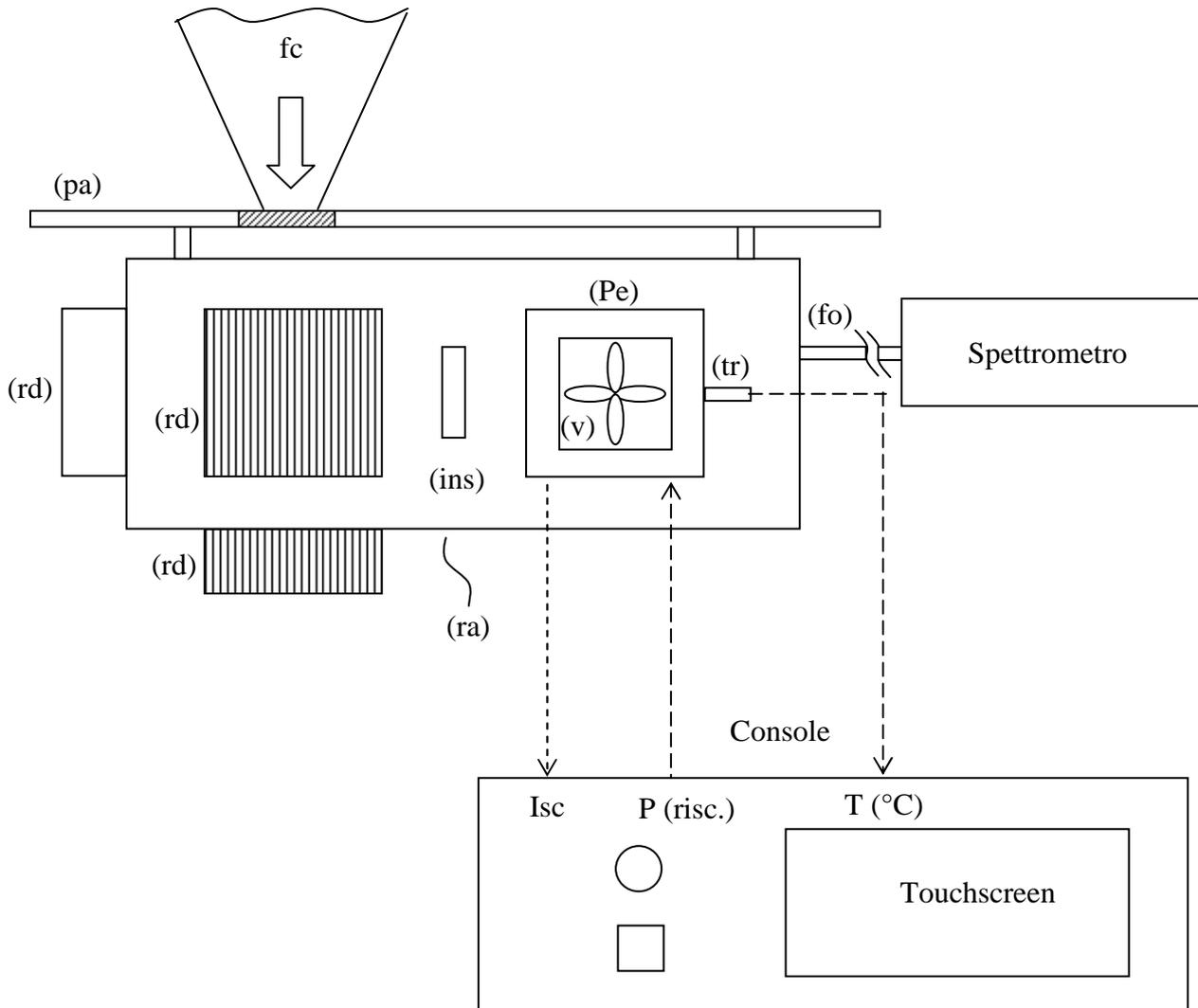


Figura 18. Schema completo del radiometro DCR comprensivo degli accessori al radiometro di base e della strumentazione per la termoregolazione del fotorivelatore e per la misura della corrente di c.c. dello stesso tramite una centralina, e infine per la misura dello spettro della radiazione tramite uno spettrometro esterno. (pa) parete superiore schermante; I_{sc} corrente di corto circuito; $P(\text{risc.})$ potenza elettrica trasferita al sistema Peltier per il raffreddamento della cella; $T(^{\circ}\text{C})$ misura della temperatura da parte del termistore (tr); R_{sh} valore impostato del carico resistivo del fotorivelatore; console: centralina di controllo del radiometro; touchscreen: schermo per l'introduzione dei parametri e dei comandi del radiometro a cavità.

Per operare con la centralina DCR5000 si procede dapprima impostando la temperatura del fotorivelatore (tipicamente 25 °C), poi impostando la resistenza di shunt R_{sh} per il fotorivelatore. Generalmente una o più resistenze di shunt di precisione sono stabilite fin dall'inizio e montate in prossimità del fotorivelatore. In alternativa, si può usare una cassetta esterna di resistenze campione (vedi Fig. 20e).

Dopo aver atteso la stabilizzazione della temperatura del fotorivelatore, si procede alla lettura della corrente di c.c. I_{sc} , riportata sullo schermo, e dedotta dalla centralina a partire dal valore di R_{sh} e della caduta di tensione misurata ai capi della resistenza. Il valore di I_{sc} fornito dalla console è poi associato alla potenza o irradianza in ingresso al radiometro, una volta che questo sia stato opportunamente calibrato.

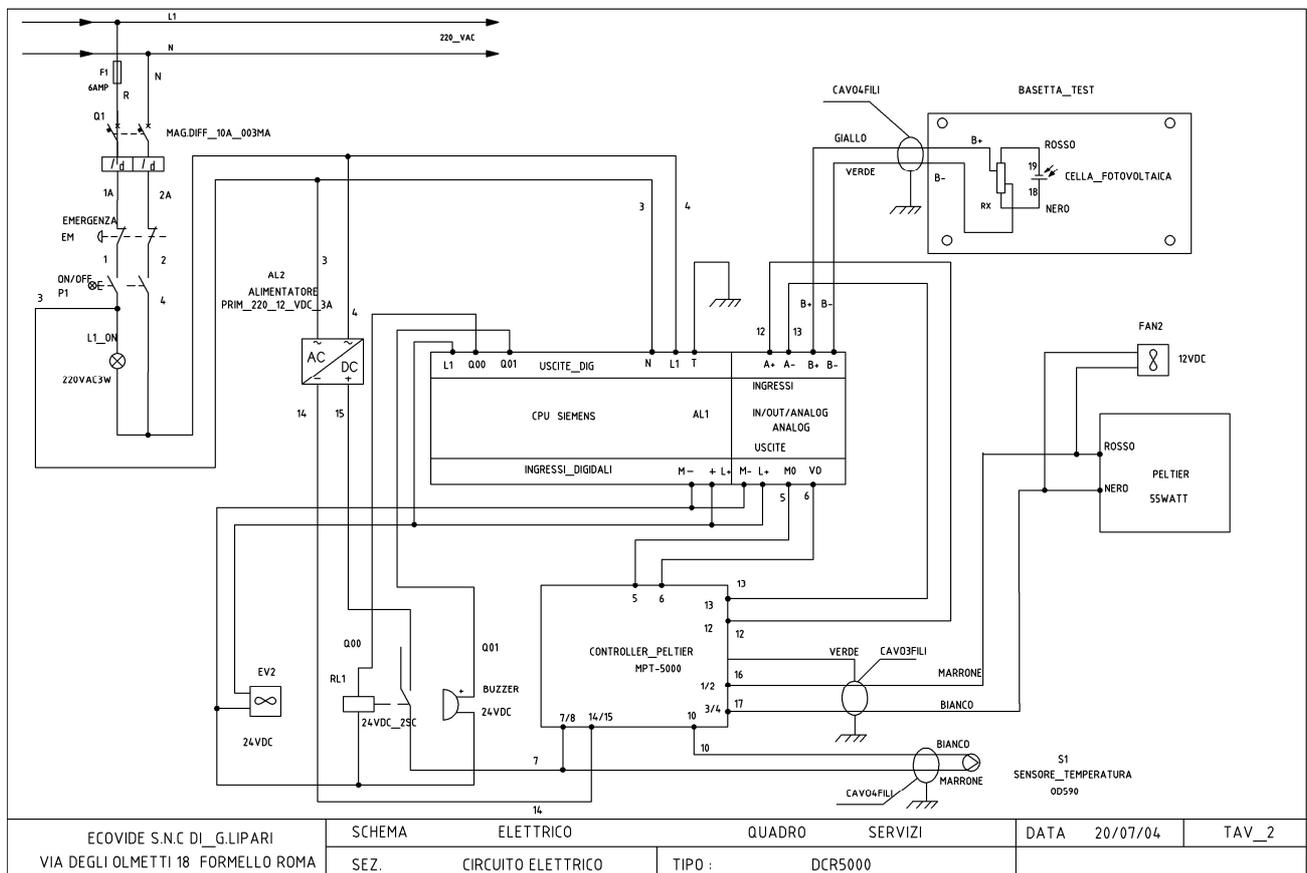


Figura 19. Schema elettrico della centralina DCR5000 per il controllo del radiometro DCR. Il radiometro, completo della centralina di controllo, è stato realizzato dalla Ditta ECOVIDE (Formello, RM).

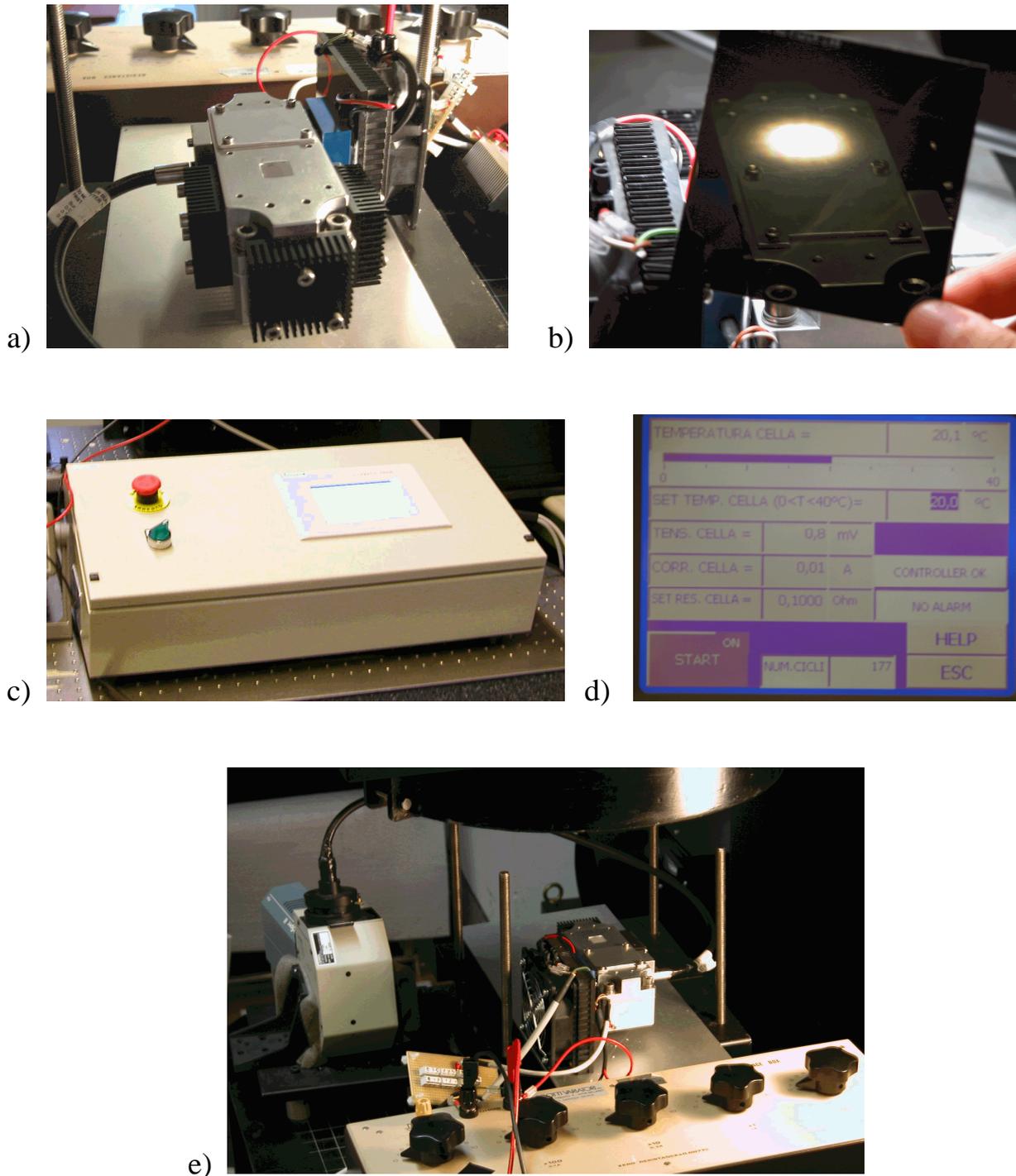


Figura 20. a) Foto del radiometro DCR completo degli accessori, installato sotto una sorgente di luce concentrata; manca lo schermo (pa). b) La foto mostra l'apertura d'ingresso (w1) illuminata. c) Vista esterna della centralina di controllo. d) Foto del touchscreen della centralina; sono visibili i parametri impostati $T(^{\circ}\text{C})$, $R_{sh}(\Omega)$, e le misure di $T(^{\circ}\text{C})$, $V(\text{mV})$ e $I_{sc}(\text{mA}) = V(\text{mV}) / R_{sh}(\Omega)$. e) Foto d'insieme del radiometro DCR durante la misura di radiazione concentrata; la sorgente è visibile in alto, la resistenza campione R_{sh} in primo piano e lo spettrometro ad array di diodi sulla sinistra.

In Fig. 20 sono mostrate alcune foto del radiometro DCR collegato a tutta l'apparecchiatura necessaria per la misura. La Fig. 21 mostra lo schema dell'apparato di calibrazione del radiometro.

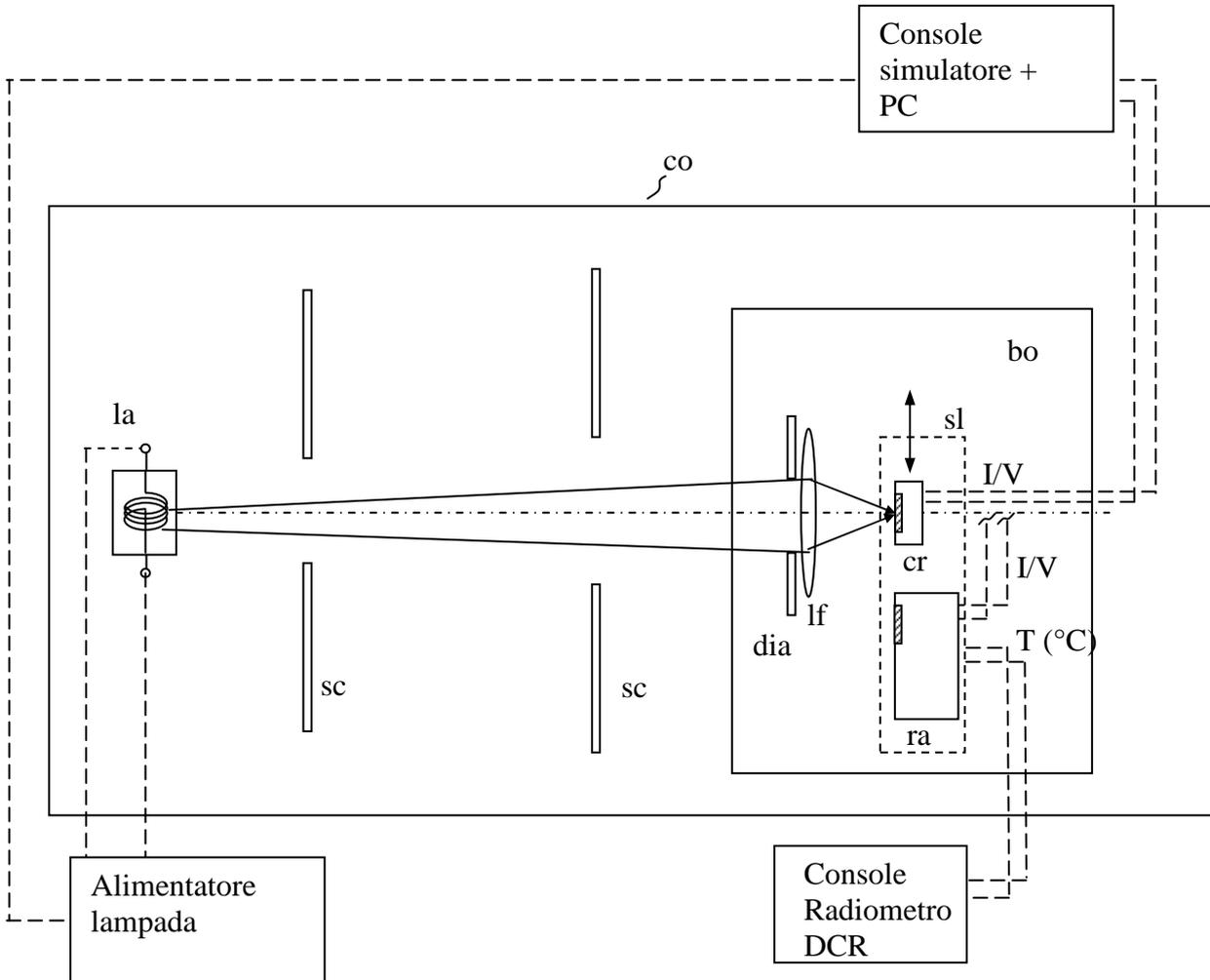


Figura 21. Schema dell'apparato usato per la calibrazione del radiometro; (la) lampada a flash; (sc) schermo; (dia) diaframma; (co) camera oscura; (lf) lente di Fresnel; (cr) cella di riferimento; (ra) radiometro a cavità DCR; (bo) banco ottico; (sl) slitta; I/V: caratteristica I/V; T(°C): temperatura controllata della cella del radiometro DCR. L'alimentatore della lampada è pilotato dal computer in sincronia con la misura della caratteristica I/V sulla cella (cr) e sul radiometro DCR.

Il sistema di misura è un simulatore solare impulsato PASAN mod. 3B, posto all'interno di una camera oscura (co). Una lampada a flash (la), alimentata da un alimentatore esterno, illumina una zona della camera dove sono posti una cella di riferimento (cr) tipo SP HECO252 ed il radiometro DCR da calibrare (ra). La radiazione incidente sul fondo della camera (co), è tipicamente

dell'ordine di 100 mW/cm^2 , corrispondenti all'irraggiamento di 1 *sole*. Per avere livelli di concentrazione della radiazione superiori ad 1 *sole*, tra lampada e cella/radiometro è posta una lente di Fresnel di grandi dimensioni (lf) la cui apertura è regolata tramite un diaframma (dia) (vedi Fig. 20). La cella di riferimento (cr) e il radiometro (ra) sono posti su un banco ottico (bo) insieme al concentratore, in corrispondenza del fuoco della lente (lf), dove viene effettuata la misura d'irraggiamento concentrato. Regolando il diaframma (dia) della lente, è possibile regolare la potenza totale incidente sulla lente e quindi il livello di concentrazione raggiunto sul suo fuoco. Sul fuoco della lente di Fresnel viene posta dapprima la cella di riferimento (cr), la stessa impiegata nel radiometro come fotorivelatore. La cella (cr) è posta di fronte alla lente (lf) in modo da raccogliere tutta la luce concentrata. La misura di riferimento di tipo a "flash" consiste nella misura della caratteristica I-V della cella di riferimento, eseguita nel breve intervallo di tempo di accensione della lampada e in corrispondenza del "plateau", di ~10 ms, della curva d'irraggiamento. Tale caratteristica è ottenuta tramite una console di misura, cui è collegata la cella di riferimento, provvista dell'elettronica per il sincronismo della misura con l'accensione della lampada e per l'inserimento del carico elettronico variabile. La misura della corrente di c.c., I_{sc} , in particolare, fornisce il livello d'irraggiamento, ovvero la potenza totale incidente sulla cella.

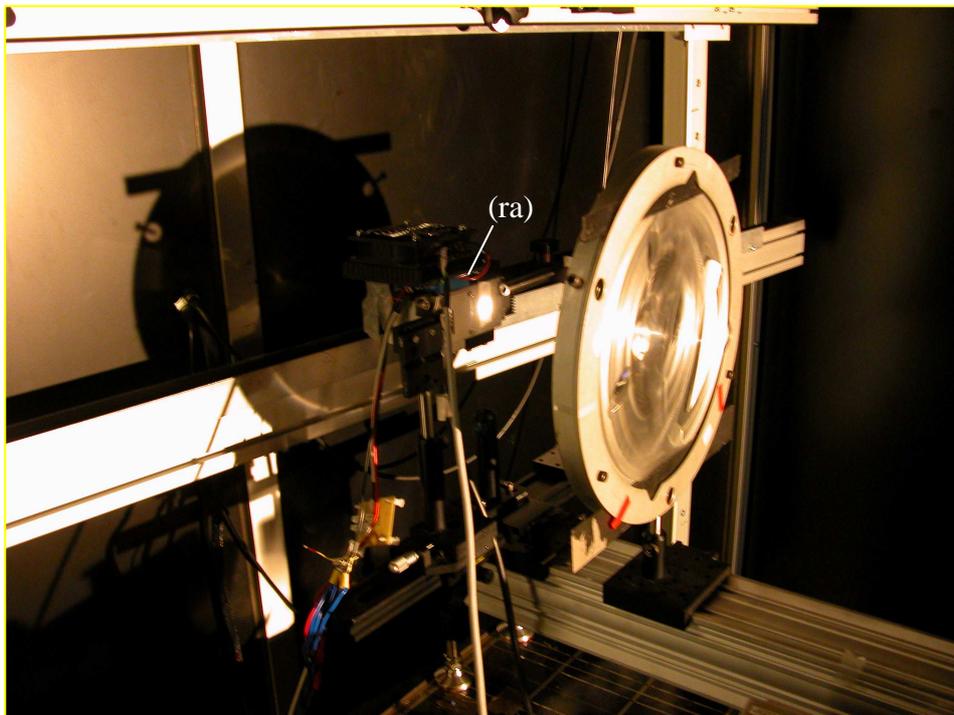


Figura 22. E' illustrato il radiometro sottoposto a irraggiamento concentrato durante le operazioni di calibrazione effettuate tra mite il simulatore solare impulsato PASAN mod. 3B.

Dopo la misura sulla cella di riferimento (cr), senza alterare la geometria del sistema, viene posto sul fuoco della lente il radiometro DCR (ra) traslando assieme (cr) e (ra) sulla slitta (sl) che si muove trasversalmente al fascio e che è vincolata al tavolo ottico (bo). Esso è controllato dalla propria console per quanto riguarda la termoregolazione del fotorivelatore, mentre il fotorivelatore del radiometro DCR è connesso al posto della cella di riferimento (cr) per la misura I/V. Si procede così alla stessa misura precedente, effettuata però sul fotorivelatore del radiometro DCR, anziché sulla cella di riferimento.

La finestra d'ingresso del radiometro è posizionata esattamente dove era posizionata la cella di riferimento. La calibrazione del radiometro richiede naturalmente che al suo ingresso vada esattamente la stessa radiazione che è stata irraggiata sulla cella di riferimento, e quindi la finestra d'ingresso deve essere opportunamente scelta affinché ciò si verifichi esattamente. Dopo aver misurato la caratteristica I-V del fotorivelatore del radiometro e, in particolare, dopo aver registrato la corrente di c.c. corrispondente, si agisce sul diaframma (dia) posto davanti a (lf) per aumentare o diminuire la potenza luminosa totale incidente sulla lente e disponibile sul fuoco.

Ripetendo per un certo numero di punti questa procedura, si disporrà di una serie di coppie di valori di I_{sc} per la cella di riferimento (cr) e per il radiometro (ra), che saranno riportati sul grafico di calibrazione. Un esempio di questo grafico, ricavato per una temperatura del fotorivelatore del radiometro di 25°C, è mostrato in Fig. 23, dove è riportata la I_{sc} del fotorivelatore del radiometro in funzione della I_{sc} della cella di riferimento, per valori d'irraggiamento compresi tra ~50 e ~250 *sol*. L'irraggiamento in *sol* è legato alla fotocorrente I_{sc} della cella di riferimento (coordinata x) dalla relazione: $C(sol) \sim 20 \cdot I_{sc}(A)$. Le misure descritte nel seguito sono state effettuate scegliendo una finestra d'ingresso quadrata di $1.4 \times 1.4 \text{ cm}^2 = 1.96 \text{ cm}^2$, in grado di raccogliere tutta la potenza incidente sulla cella di riferimento. I punti del grafico di Fig. 23 si riferiscono ai quattro diversi inserti adoperati (vedi Fig. 12c e 13a), di diametro e area rispettivamente: Ins1, $D = 0.38 \text{ cm}$ ($A = 0.113 \text{ cm}^2$); Ins2, $D = 0.54 \text{ cm}$ ($A = 0.229 \text{ cm}^2$); Ins3, $D = 0.78 \text{ cm}$ ($A = 0.478 \text{ cm}^2$); Ins4, $D = 0.98 \text{ cm}$ ($A = 0.113 \text{ cm}^2$). I punti relativi a ciascun inserto sono ben interpolati da una retta, la retta di calibrazione, la cui pendenza media fornisce il fattore di attenuazione $f_A = P_0/P_m$ del radiometro per lo specifico inserto adoperato. Dalla pendenza della retta di calibrazione si ottiene il fattore di attenuazione sperimentale f_A per ciascun inserto, che è riportato in Fig. 24a in funzione dell'area dell'apertura dell'inserto stesso insieme alle curve teoriche di f_A , già calcolate (vedi Fig. 7), riportate per diversi valori della riflettanza di parete R_p .

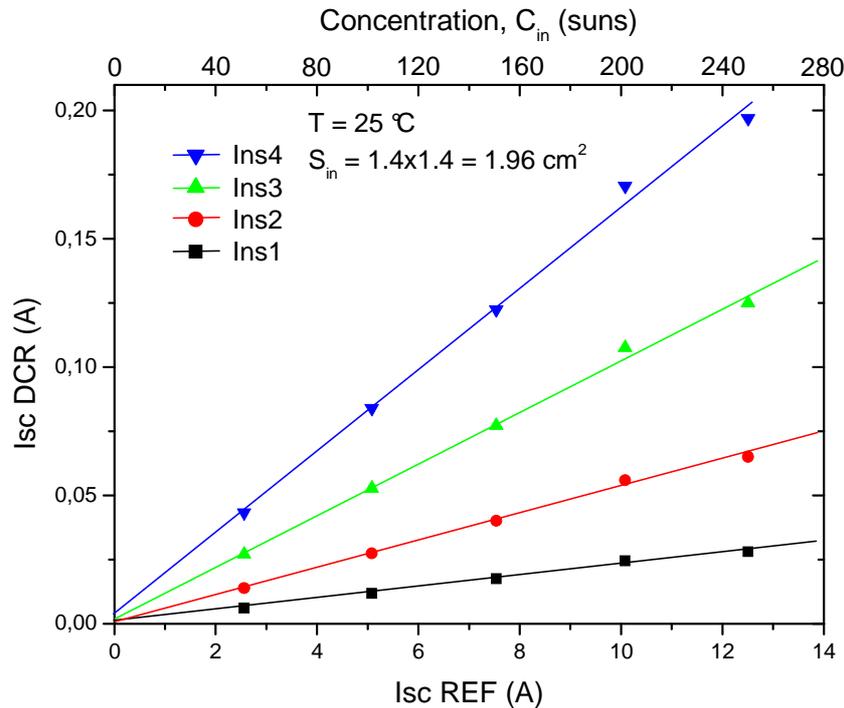


Figura 23. Rette di calibrazione del radiometro DCR ottenute da misure impulsive di I_{sc} sul radiometro DCR e sulla cella di riferimento SP HECO252, relative ai quattro inserti adoperati e caratterizzati dai diametri: D (Ins1) = 3.8 mm; D (Ins2) = 5.4 mm; D (Ins3) = 7.8 mm; D (Ins4) = 9.8 mm. Misure a $T=25^{\circ}\text{C}$. Area della finestra (w1) $S_{in}= 1.96 \text{ cm}^2$.

La riflettività della parete interna del radiometro DCR è stata valutata misurando la riflettanza spettrale di due tappi del radiometro mediante lo spettrometro Perkin-Elmer Lambda 900, nell'intervallo spettrale corrispondente alla regione di sensibilità dei fotorivelatori al Silicio, ovvero 300-1200 nm. Lo spettro di $R_p(\lambda)$ è riportato in Fig. 25. Per l'intervallo spettrale esaminato, si trova una riflettanza media $\bar{R}_p \approx 95\%$.

Dalla Fig. 24a si trova che l'andamento del fattore di attenuazione sperimentale concorda molto bene con quello delle curve calcolate per alcuni valori di R_p prossimi al valore sperimentale medio $\bar{R}_p \approx 95\%$ (vedi Fig. 25). Questo risultato dimostra con molta evidenza la validità del modello ottico presentato e discusso precedentemente. Dalla Fig. 24a si ricava inoltre che, con un'opportuna scelta dell'inserto tra quelli da noi realizzati per il radiometro DCR, è possibile regolare il fattore di attenuazione sperimentale entro un ampio intervallo di valori. Nel caso specifico esaminato di $S_{in} = 1.96 \text{ cm}^2$, si trova un fattore di attenuazione variabile da $\sim 50\text{X}$ a $\sim 500\text{X}$.

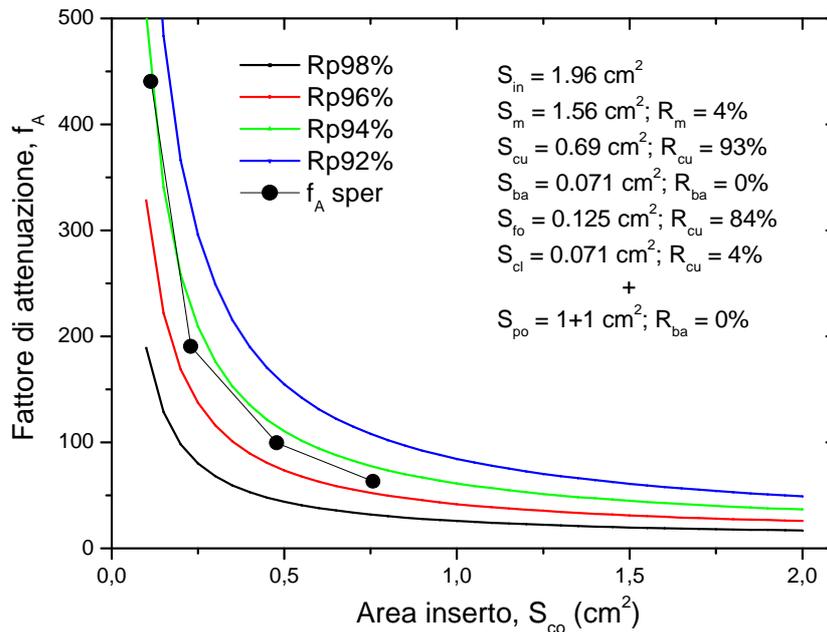
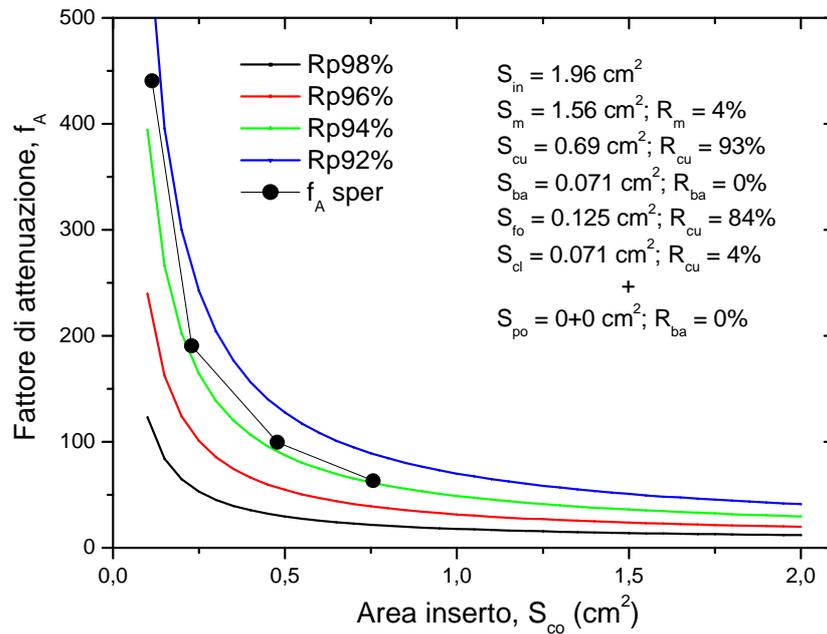


Figura 24. a) Grafico rappresentante il fattore di attenuazione f_A del radiometro DCR in funzione dell'area dell'apertura dell'inserto. Sono riportati i dati sperimentali e le curve teoriche dedotte dal modello ottico, calcolate per valori di riflettività della parete del DCR, R_p , prossimi a quello misurato su due tappi del DCR (vedi Fig. 23). b) Stesso grafico di a) nel quale però le curve teoriche sono state ricalcolate tenendo conto di una superficie assorbente spuria di 1 cm^2 nella prima cavità e di 1 cm^2 nella seconda cavità.

Tali limiti possono essere estesi impiegando inserti con apertura di dimensione diversa. Tutto ciò rende il radiometro DCR adatto ad essere impiegato per la misura di un ampio spettro di valori d'intensità della radiazione. I dati sperimentali di f_A non concordano perfettamente con quelli teorici previsti per una riflettività $\bar{R}_p \approx 95\%$. La Fig. 24a mostra, infatti, che il fattore d'attenuazione sperimentale è lievemente più alto di quello previsto dai dati teorici e si accorda con la curva calcolata per una riflettività $\bar{R}_p \approx 94\%$. Il motivo di questa discrepanza è da attribuire alla presenza, all'interno delle due cavità, di zone otticamente "morte", visibilmente nere, nelle quali la luce viene fortemente assorbita. Ci riferiamo in particolare alle cornici della finestra di separazione tra le due cavità, alla linea di contatto tra le due sezioni del radiometro e ai bordi della finestra (w2) dove viene affacciato il fotorivelatore. Queste perdite non sono immediatamente quantificabili in quanto per esse non si è in grado di definire precisamente un'area e una riflettività. Per questo motivo esse non sono state inserite fin dall'inizio nel modello ottico. Alla luce però dei dati sperimentali ottenuti, è possibile ora stimare questo tipo di perdite introducendo un parametro ottico efficace del tipo "superficie morta" S_{mo} , con riflettanza nulla $R_{mo} = 0\%$, ovvero con assorbimento del 100%, che permetta di raggiungere un accordo tra dati sperimentali e dati teorici. Inserendo questo nuovo parametro nel modello, si è trovato che l'aggiunta di una $S_{mo} = 1 \text{ cm}^2$ nella prima e nella seconda cavità permette di accordare molto bene i punti sperimentali con la curva teorica corrispondente a $\bar{R}_p \approx 95\%$. I risultati sono riportati in Fig. 24b. E' stato verificato che, distribuendo la "superficie morta" complessiva di $S_{mo} = 2 \text{ cm}^2$ tra le due cavità, non si hanno apprezzabili variazioni dei risultati. Ciò dimostra che la "superficie morta" ha un effetto ottico simmetrico sulle due cavità. Il valore trovato di S_{mo} può essere giustificato dalla presenza di uno spesso bordo assorbente nella finestra (w2), causato dal montaggio arretrato del fotorivelatore rispetto alla parete interna della seconda cavità. Un diverso disegno della finestra (w2) può sicuramente ridurre queste perdite ottiche spurie.

La calibrazione così effettuata è valida per il particolare valore di temperatura cui è stato portato il fotorivelatore e per il particolare spettro della lampada a flash. Tenendo conto che la lampada a flash usata è del tipo ad arc-Xe, essa ha uno spettro molto prossimo a quello dell'irraggiamento solare globale AM1.5G. Quindi la calibrazione così effettuata è valida per misure di fasci concentrati prodotti da impianti a concentrazione della luce solare. In quanto detto, però, bisogna tener conto di una certa imprecisione che deriva dal fatto che la radiazione solare concentrata ha lo spettro della componente diretta della luce solare (AM1.5D), il cui spettro è leggermente diverso da quello della sua componente globale (diretta + diffusa) [15].

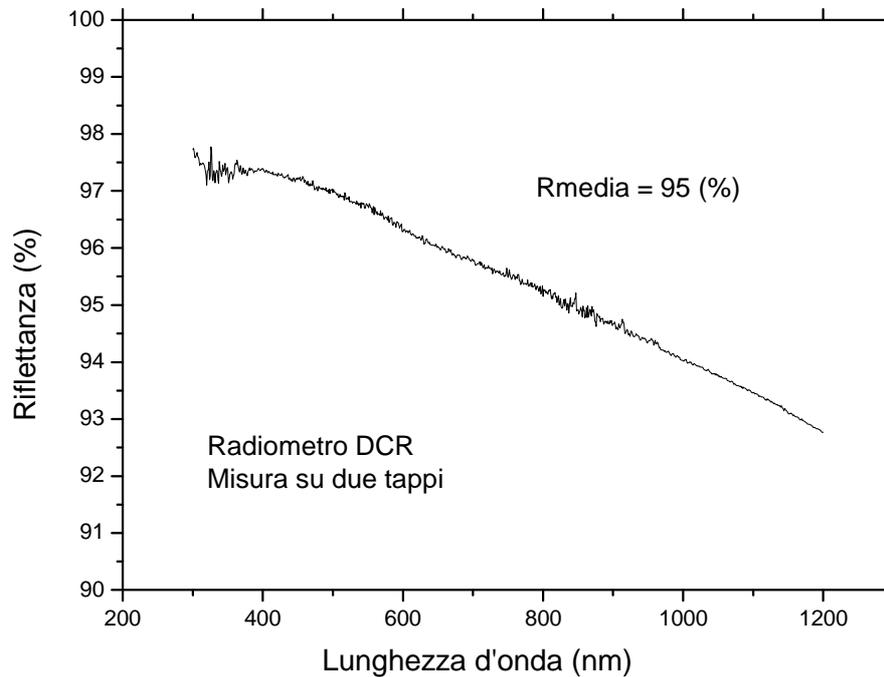


Figura 25. Curva media di riflettività spettrale misurata su due tappi del radiometro DCR con lo spettrometro Perkin-Elmer Lambda 900. L’intervallo spettrale selezionato è 300-1200 nm, equivalente alla regione di sensibilità delle celle SunPower. In detto intervallo si trova $\bar{R}_p \approx 95\%$.

Il radiometro DCR è stato recentemente brevettato. La domanda di brevetto è stata depositata in data 23/12/2004 con il numero di deposito BO2004A000798 – invenzione C-04/23 (Parretta, Privato, Maccari, Nenna) e porta il titolo: “Dispositivo a Sfere Integratrici per l’Attenuazione di Radiazioni”.

4. CONCLUSIONI

In conclusione, è stato descritto un metodo e la relativa apparecchiatura per la caratterizzazione di fasci di radiazione luminosa concentrata, in particolare quella prodotta da impianti solari a concentrazione di tipo fotovoltaico, termico o termodinamico. Questo metodo e la relativa apparecchiatura possono essere altresì impiegati con vantaggio in molti degli esperimenti che frequentemente si svolgono nei laboratorio con fasci di radiazione concentrata. Per fasci di radiazione concentrata si intendono fasci di radiazione con livelli d’irraggiamento, o irradianze,

superiore a quello dell'irraggiamento solare esterno, dell'ordine di 1 kW/m^2 o 0.1 W/cm^2 . La strumentazione oggi a disposizione per svolgere questo tipo di misure non è abbastanza sviluppata e quindi spesso si ricorre a metodi di misura approssimativi. Il presente lavoro intende dare un contributo allo sviluppo di apparecchiature, o radiometri, specificamente progettati e realizzati per la misura di irradianze superiori ad 1 sole incidenti su una determinata area. Il radiometro qui presentato è chiamato "radiometro a doppia cavità" e può essere realizzato con un minimo di due cavità integratrici ed attenuatrici della radiazione incidente. La versione preferita di questo radiometro, denominata DCR (Double Cavity Radiometer) è un radiometro a doppia cavità che è stato progettato, modellato otticamente, realizzato ed illustrato in dettaglio nella presente invenzione. Le principali caratteristiche del radiometro a cavità nella sua configurazione più generale sono di seguito elencate:

- i) Può misurare sia la potenza totale del fascio che la sua distribuzione spaziale (profilo) su una determinata superficie o sezione.
- ii) Permette l'attenuazione controllata della radiazione incidente, con modalità che ne assicurano semplicità e precisione.
- iii) Può operare a livelli di concentrazione, intesi rispetto alla radiazione solare terrestre di 1 sole , dell'ordine delle unità fino a concentrazioni dell'ordine delle migliaia. Per questa sua caratteristica di flessibilità, il radiometro a cavità può essere considerato un radiometro di tipo universale, cioè adatto all'impiego in qualsiasi applicazione della luce concentrata.
- iv) Riducendo opportunamente l'area della finestra d'ingresso è possibile effettuare una mappatura del fascio concentrato con un'alta risoluzione.
- v) La sua risposta è indipendente dalla direzione di provenienza della radiazione in ingresso e cioè dalla divergenza angolare del fascio.
- vi) Il fotorivelatore è illuminato completamente e uniformemente (sia dal punto di vista spaziale che dell'angolo d'incidenza) qualunque sia l'estensione spaziale e la distribuzione angolare del fascio in ingresso.
- vii) La misura della radiazione è di tipo stazionario, ovvero non impulsato, in quanto il livello di attenuazione può essere regolato in maniera tale che la radiazione che raggiunge il radiometro a bassa intensità non ne alteri apprezzabilmente le caratteristiche termiche. Questo fatto rende molto semplice la misura e molto economica l'elettronica di controllo del radiometro.
- viii) Può essere realizzato facilmente in una versione portatile per misure outdoor su impianti solari a concentrazione.

- ix) E' costituito essenzialmente da tre unità: a) la cavità ottica; b) l'unità di termoregolazione e di misura elettrica del fotorivelatore; c) lo spettrometro.
- x) Può essere realizzato di dimensioni variabili a seconda delle applicazioni cui è destinato. La scelta di piccole dimensioni della cavità, e quindi piccoli spessori complessivi del corpo del radiometro, lo rende più adatto alla misura di profili d'intensità su superfici inamovibili. Per misure di potenza totale, invece, la finestra d'ingresso del radiometro può essere dimensionata in proporzione alle dimensioni del fascio.
- xi) Le due cavità ottiche non devono essere necessariamente uguali, ma possono essere dimensionate separatamente. Ad esempio, la seconda cavità può essere costruita più grande se è necessario inserire su di essa un maggiore numero di rivelatori.
- xii) Il radiometro a cavità è realizzato con una serie di accessori che lo rendono più funzionale. Essi comprendono: uno schermo frontale per ridurre il riscaldamento per irraggiamento esterno della cavità, e per proteggere dalla radiazione incidente i vari connettori elettrici ed ottici che afferiscono ad essa; una serie di radiatori a convezione naturale attorno ed esternamente alla prima cavità.
- xiii) La regolazione del fattore di attenuazione dell'intensità della radiazione, ovvero del rapporto tra irradianza in ingresso al radiometro e irradianza misurata sul fotorivelatore, è fatta semplicemente scegliendo un particolare inserto provvisto di un'apertura controllata, che viene inserito in una fenditura posta tra le due cavità ottiche. Ogni inserto è calibrato per produrre, a parità di altri fattori (spettro della radiazione e temperatura del fotorivelatore), un ben determinato fattore di attenuazione.
- xiv) Il radiometro può essere realizzato con più di due cavità in serie, ognuna delle quali provvede ad attenuare la radiazione di un certo fattore. In tal caso è previsto, per ogni coppia di cavità adiacenti, l'uso di un inserto calibrato.

Il radiometro DCR è stato preventivamente modellato seguendo un procedimento teorico originale. I risultati del modello sono stati poi confrontati con i dati sperimentali e sono risultati molto simili, a conforto che il modello ottico sviluppato si può considerare valido, da impiegare come uno strumento utile per il progetto di altre versioni di radiometro.

 <p>Unità Tecnico Scientifica Fonti Rinnovabili e Cicli Energetici Innovativi</p>	<p>Documento EGE 04009</p>	<p>Pag. 45 di 46 Rev. 0</p>
---	---------------------------------------	---------------------------------

RIFERIMENTI

- [1] R.M. Swanson, “The promise of Concentrators”, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8**, 93-111 (2000).
- [2] A. Steinfeld, “Solar hydrogen production via a two-step water-splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions”, International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 611-619.
- [3] Y. Tamaura, A. Steinfeld, P. Kuhn, K. Ehrensberger, “Production of solar hydrogen by a novel, two-step, water-splitting thermochemical cycle”, Energy - The International Journal 20 (1995) 325-330.
- [4] H. Ohya, M. Yatabe, M. Aihara, Y. Negishi, T. Takeuchi, “Feasibility of hydrogen production above 2500 K by direct thermal decomposition reaction in membrane reactor using solar energy”. International Journal of Hydrogen Energy 27 (2002) 369-376.
- [5] A. Kogan, “Direct solar thermal splitting of water and on-site separation of the products - IV. Development of porous ceramic membranes for a solar thermal water-splitting reactor”. International Journal of Hydrogen Energy 25 (2000) 1043-1050.
- [6] Ohta, Tokio; Editor, “Solar-Hydrogen Energy Systems. An Authoritative Review of Water-Splitting Systems by Solar Beam and Solar Heat: Hydrogen Production, Storage, and Utilization”. (1979), 264 pp. Publisher: (Pergamon Press, Oxford, Engl.)
- [7] E.L. Dereniak, D.G. Crowe, “Optical and infrared detectors”, John Wiley & Sons, 1984.
- [8] “Handbook of Applied Photometry”, ed. by C. DeCusatis, Optical Society of America and Springer-Verlag New York, Inc., 1988, p. 1.
- [9] SunPower Corporation, 435 Indio Way, Sunnyvale, CA94086, USA.
<http://www.sunpowercorp.com/>.
- [10] “Diffuse Reflectance Coatings and Materials”, Labsphere, 1996 Catalog.
- [11] “Sphere Systems and Instrumentation”, Labsphere, 2000-2001 Catalog II.
- [12] “A Guide to Integrating Sphere Radiometry and Photometry”, Labsphere Catalog.
- [13] “Misurare il colore. Spettrofotometria, fotometria e colorimetria. Fisiologia e percezione”, a cura di C. Oleari, Società Italiana di Ottica e Fotonica, SIOF, Hoepli Editore S.p.A. 1998.
- [14] “Emissivity Tables”, Publ. No. 1 557 773 Rev.A – English (EN) – June 10, 2003.

- [15] K.A. Emery, D.L. King, 19th IEEE PVSC Tutorial “Photovoltaic Measurements – Science and Engineering”, 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Louisiana, USA, May 4-8, 1987.