

Caratterizzazione di strumenti per la misura della radiazione ottica tramite confronti effettuati presso il Laboratorio di Ottica di Arpa Piemonte

Saudino Fusette S., Facta S., Bonino A., Anglesio L. d'Amore G
ARPA Piemonte, Via Jervis 30, 10015 Ivrea (TO), s.saudino@arpa.piemonte.it

Riassunto

La misura della radiazione ottica si rileva spesso complessa a causa dell'ampio intervallo spettrale in cui le sorgenti emettono e del diverso effetto biologico che, in funzione della lunghezza d'onda, possono provocare, da cui deriva talvolta la necessità di confrontarsi con grandezze fisiche efficaci. In questo lavoro verranno presentate le caratteristiche di risposta, ottenute a partire da un'analisi in laboratorio, di alcuni strumenti utilizzati. La conoscenza di tali caratteristiche e in particolare della loro deviazione rispetto al caso ideale permette di stimare l'incertezza associata al dato misurato e di determinarne i coefficienti correttivi.

Verranno inoltre presentati i risultati delle misure effettuate con questi strumenti su alcune sorgenti con differente spettro di emissione e i risultati verranno confrontati con quelli ottenuti con uno spettroradiometro a scansione a doppio monocromatore. I confronti evidenzieranno la necessità di calibrare attentamente la scelta dello strumento da utilizzare, in funzione delle caratteristiche di emissione della sorgente e delle condizioni geometriche di misura.

INTRODUZIONE

La misura della radiazione ottica può essere effettuata per mezzo di radiometri a banda larga o spettroradiometri. I radiometri sono strumenti che forniscono il valore della grandezza fisica per cui sono tarati (irradianza, illuminamento, potenza...) integrata nell'intervallo spettrale in cui operano. Gli spettroradiometri invece permettono di ottenerne la distribuzione spettrale e si dividono in spettroradiometri a scansione e spettroradiometri ad array di CCD. Con i primi si ottiene la distribuzione spettrale effettuando una scansione alle varie lunghezze d'onda. Con i secondi lo spettro viene rilevato contemporaneamente su tutte le lunghezze d'onda.

La scelta dello strumento da utilizzare dipende dalle caratteristiche della sorgente (in particolare dallo spettro di emissione e dalla variabilità nel tempo) e dalla grandezza che si vuole ottenere, se fisica o fisica efficace, ovvero ponderata su uno spettro ad azione biologica. In entrambi i casi l'utilizzo di uno spettroradiometro a scansione a doppio monocromatore consente di ottenere risultati più precisi, anche se il tempo di scansione ne limita l'utilizzo al caso in cui l'emissione della sorgente non sia significativamente variabile nel tempo. In caso contrario gli spettroradiometri a singolo monocromatore con rivelatore ad array CCD possono rappresentare una valida alternativa per misure nel visibile e nel vicino infrarosso. Nella regione spettrale dell'ultravioletto (UV), invece, il dato misurato può risultare poco attendibile a causa dell'elevata luce parassita (stray light).

Nel caso in cui non sia necessario conoscere la distribuzione spettrale della sorgente le misure possono essere effettuate con radiometri a banda larga. Sono strumenti di semplice utilizzo e caratterizzati da un tempo di risposta veloce, ma le misure possono essere affette da una imprecisione non trascurabile in quanto dipendono dalla risposta spettrale del radiometro. L'attendibilità della misura risulta quindi tanto minore quanto più la risposta spettrale si discosta dalla risposta ideale, nel caso di radiometri per la misura di grandezze fisiche non ponderate, o dallo spettro ad azione biologica, nel caso di radiometri per la misura di grandezze efficaci. La deviazione della risposta spettrale da quella ideale rende inoltre il risultato delle misure funzione dello spettro della sorgente utilizzata durante la taratura e dello spettro della sorgente misurata.

Sulla base di quanto riportato, al fine di valutare l'accuratezza e la riproducibilità di misure ottenute con strumentazione diversa, si sono analizzate le caratteristiche in laboratorio di alcuni strumenti rappresentativi delle tipologie attualmente utilizzate e si sono confrontati i dati ottenuti nella misura di sorgenti con spettro d'emissione differente.

MATERIALI E METODI

Gli strumenti oggetto dell'analisi riportata sono stati i seguenti:

- un radiometro UVA

- un radiometro UVB
- un radiometro UVE (per misure di irradianza efficace ponderata con lo spettro ad azione eritemale)
- un luxmetro
- un spettroradiometro con rivelatore ad array CCD

Tutti questi strumenti sono tarati in irradianza.

Sono state dapprima determinate le caratteristiche di risposta in laboratorio dei vari strumenti. Quindi sono stati effettuati dei confronti nella misura di sorgenti aventi spettro di emissione differente.

L'obiettivo dell'analisi in laboratorio è stato la valutazione dell'incertezza associata all'utilizzo dei radiometri e del luxmetro nella misura di sorgenti con spettro d'emissione differente rispetto a quello della sorgente con cui sono stati tarati e in condizioni di irradiazione del sensore geometricamente diverse rispetto a quelle di taratura. Si sono inoltre calcolati per alcune tipologie di sorgenti i fattori correttivi che permettono di correggere il risultato della misura radiometrica, noto lo spettro della sorgente misurata e la risposta spettrale del radiometro.

I risultati delle misure effettuate sono stati quindi confrontati con quelli ottenuti con uno spettroradiometro a scansione Optronic Laboratories OL756 UV-VIS 250-800 nm a doppio monocromatore con risposta nell'intervallo spettrale 250-800 nm e ottica d'ingresso una sfera integratrice. Tale strumento viene tarato con frequenza non superiore a 6 mesi presso il Laboratorio di Ottica di Arpa Piemonte utilizzando una lampada al tungsteno riferibile NIST.

CARATTERIZZAZIONE IN LABORATORIO

Radiometri in banda larga e luxmetro

La precisione dei dati di misura ottenuti dai radiometri a banda larga e dai luxmetri dipende dalle loro caratteristiche di risposta. In particolare i parametri che determinano il risultato della misura sono la risposta spettrale e la risposta angolare. Inoltre, essendo queste risposte generalmente differenti da quelle ideali, lo spettro della sorgente utilizzata per la taratura, quello della sorgente misurata e le condizioni geometriche di misura influiscono sui risultati. Altri parametri che, se pur qui non trattati, influenzano l'esito della misura sono la linearità di risposta, le condizioni di temperatura e di umidità e l'invecchiamento del sensore.

Sono state quindi determinate in laboratorio le risposte spettrali e angolari dei radiometri e del luxmetro. La risposta spettrale è stata determinata irradiando il sensore con luce monocromatica alle varie lunghezze d'onda a cui è sensibile. La luce monocromatica è stata ottenuta per mezzo di un doppio monocromatore Bentham DM 150 accoppiato tramite un opportuno sistema di lenti ad una sorgente allo Xenon da 150W.

La risposta spettrale $s(\lambda)$ è stata determinata misurando alternativamente, ad ogni lunghezza d'onda, la potenza $P(\lambda)$ in uscita al monocromatore con un fotodiode tarato SI-CAL-EX e l'irradianza $E(\lambda)$ rilevata dal sensore (o l'illuminamento nel caso di misura eseguita con il luxmetro). La $s(\lambda)$ è data da:

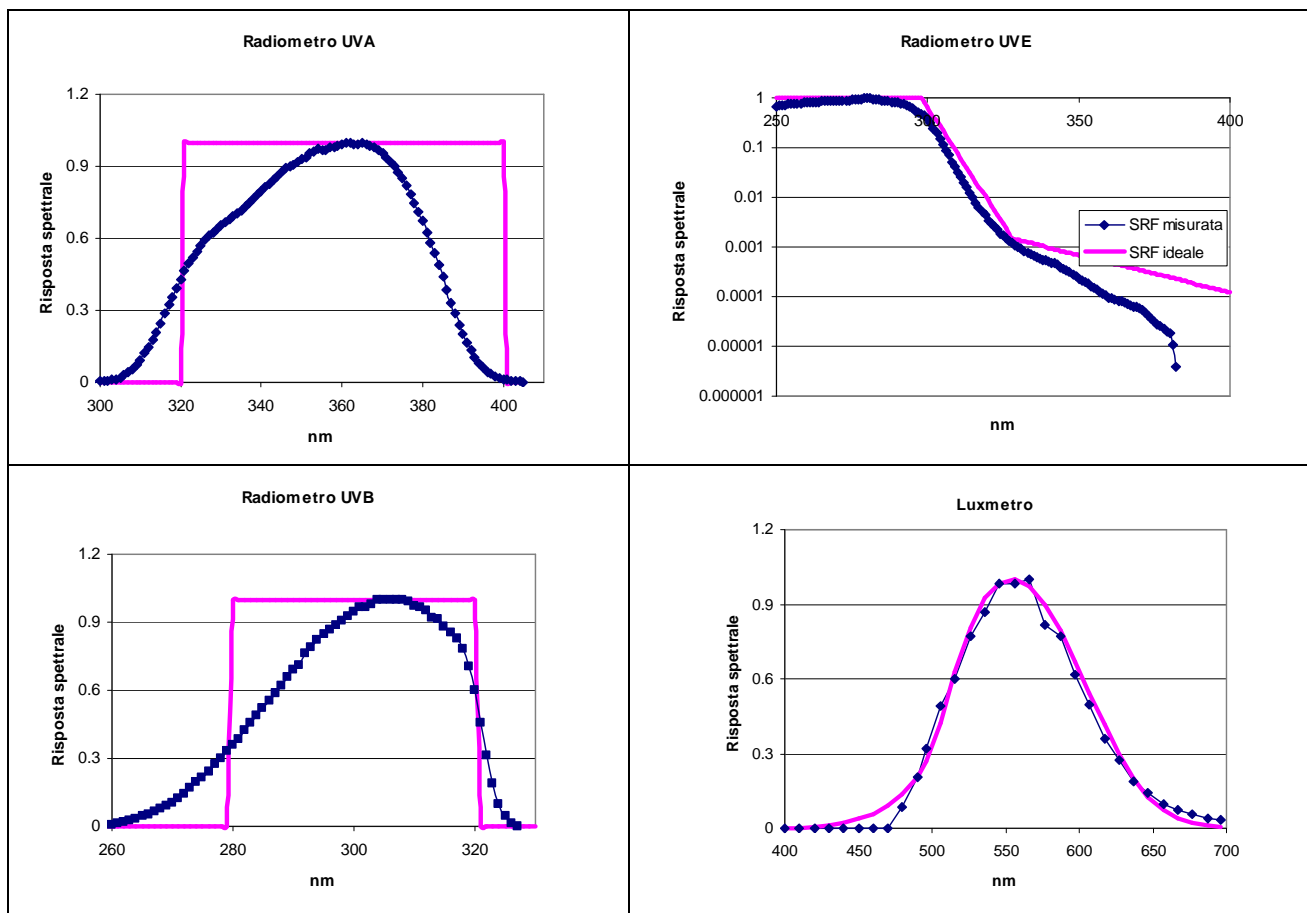
$$s(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{P(\lambda)}$$

Le risposte spettrali ottenute normalizzate al valore massimo e confrontate con le risposte ideali sono riportate in fig.1.

La misura della risposta spettrale del radiometro UVE non è risultata possibile, essendo il segnale in uscita al doppio monocromatore inferiore alla sensibilità dello strumento, in corrispondenza delle lunghezze d'onda a cui è meno sensibile. La curva riportata in figura 1 è quindi quella fornita dalla ditta produttrice.

Da un'analisi qualitativa delle risposte spettrali dei radiometri si nota che differiscono significativamente da quelle ideali.

Figura 1. Risposte spettrali dei radiometri banda larga e del luxmetro



La conoscenza della risposta spettrale e dello spettro della sorgente utilizzata in taratura consente di determinare l'incertezza f_1' associata alla misura di sorgenti con spettro di emissione differente rispetto a quello di taratura, in accordo alla norma CIE 53,1982.

In particolare f_1' risulta:

$$f_1' = \frac{\int |s_x(\lambda) - s_T(\lambda)| d\lambda}{\int s_T(\lambda) d\lambda}$$

con

$$s_x(\lambda)' = \frac{\int S(\lambda)_A s_T(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda)_A s(\lambda) d\lambda}$$

avendo indicato con:

$s_T(\lambda)$ la risposta spettrale ideale

$S(\lambda)_A$ lo spettro della sorgente utilizzato in taratura

Tale valutazione è stata effettuata per i 3 radiometri UVA, UVB e UVE e per il luxmetro. Le sorgenti di taratura utilizzate sono state: una sorgente monocromatica a 365 nm per il radiometro UVA, una sorgente monocromatica a 295 nm per i radiometri UVB e UVE e un illuminante A (lampada alogena con temperatura di colore 2854 K) per il luxmetro. Le sorgenti monocromatiche sono state ottenute accoppiando una sorgente allo Xe da 1000 W ad un monocromatore. In merito al radiometro UVB occorre evidenziare che generalmente la taratura viene effettuata utilizzando una

sorgente monocromatica a 311 nm, ottenuta isolando con un filtro interferenziale questa riga di emissione dallo spettro di una schiera di lampade fluorescenti. L'utilizzo di un monocromatore e la necessità di illuminare completamente l'area sensibile del radiometro con un segnale di intensità sufficiente hanno portato ad allargare le fenditure d'ingresso e uscita del monocromatore, ottenendo un segnale con FWHM di 16 nm. Dal momento che la risposta ideale di un radiometro UVB è uguale a uno nell'intervallo spettrale compreso tra 280 e 315 nm e a zero al di fuori e che il radiometro UVB analizzato è sensibile a lunghezze d'onda superiori a 315 nm (fig.1), la taratura effettuata con una sorgente monocromatica a 311 nm con FWHM 16 nm avrebbe portato ad un valore errato del coefficiente di taratura.

In tabella 1 sono riportate le incertezze ottenute.

Tabella 1. Incertezza di misura dei radiometri e del luxmetro dovute alla deviazione delle risposte spettrali e angolari da quelle ideali

Strumento	Incertezza	
	Per risposta spettrale	Per risposta angolare
Radiometro UVB (315-400nm)	47 %	74%
Radiometro UVA (280-315 nm)	34 %	65%
Radiometro UVE (280-400 nm)	30 %	41%
Luxmetro	9 %	5%

La conoscenza dello spettro di emissione della sorgente misurata $S(\lambda)_z$, oltre che quello della sorgente di taratura e della risposta spettrale del radiometro, permette inoltre di valutare un fattore correttivo moltiplicativo $1/a(Z)$ da applicare alla misura radiometrica, in accordo alla norma CIE 53-1982:

$$\frac{1}{a(Z)} = \frac{\int S(\lambda)_z s(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda)_z s(\lambda)_T d\lambda} \times \frac{\int S(\lambda)_A s(\lambda)_T d\lambda}{\int S(\lambda)_A s(\lambda) d\lambda}$$

I fattori correttivi da applicare alla misura radiometrica di alcune tipologie di sorgenti sono stati calcolati e vengono riportati in tab.2. Nella sezione seguente verranno confrontati con quelli ottenuti sperimentalmente, uguali al rapporto tra misure radiometriche e spettroradiometriche.

Tabella 2. Fattori correttivi sulla misura radiometrica di alcune tipologie di sorgenti

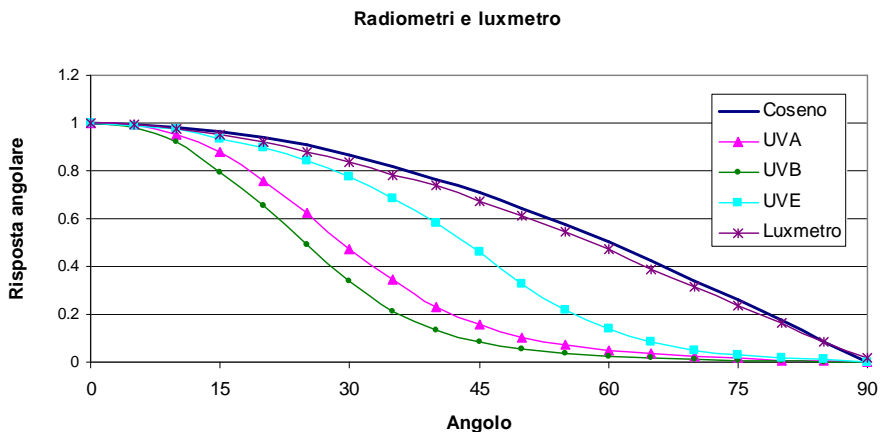
Sorgente	Fattori correttivi		
	UVA	UVB	UVE
Lampada al deuterio	1.4	0.83	0.82
Lampada alogena	1.64	0.7	0.88
Lampada allo xenon	1.5	0.77	0.83
Lampada abbronzante a bassa pressione	1.16	0.49	1.44

La misura della risposta angolare è stata ottenuta irradiando i radiometri singolarmente con una sorgente allo Xenon da 1000 W, in modo da illuminare completamente il diffusore, e facendoli ruotare su un asse passante per il centro. La corretta misura dell'irradianza prevede che il contributo delle radiazioni incidente sia proporzionale al coseno dell'angolo di incidenza calcolato rispetto alla normale della superficie ricevente (risposta coseno). In figura 2 sono riportate le risposte angolari ottenute confrontate con la risposta coseno.

Le risposte angolari dei radiometri UV diminuiscono più rapidamente della funzione coseno. Questo causa errori anche elevati nella misura di sorgenti in condizioni geometriche differenti rispetto a quelle di taratura. La taratura viene generalmente effettuata irradiando il radiometro a distanza dalla sorgente, e quindi praticamente tutta la radiazione incide sul diffusore

perpendicolarmente. Si ha quindi una sottostima del dato misurato in prossimità della sorgente, in quanto, in questa configurazione, la radiazione incide sulla superficie del sensore su più angoli. La risposta angolare del luxmetro è invece prossima a quella ideale.

Figura 2 - Risposte angolari dei radiometri e del luxmetro



La stima dell'incertezza associata alla deviazione della risposta angolare dalla risposta coseno è stata effettuata, in accordo alla norma CIE 53-1982, in termini di f_2 definito come:

$$f_2 = \int_{\varepsilon=0}^{85} |f_2(\varepsilon)| \times \sin(\varepsilon) d\varepsilon$$

avendo indicato con $f_2(\varepsilon)$ il rapporto tra la risposta angolare misurata e quella coseno, in corrispondenza dell'angolo ε , meno uno. Questa espressione restituisce un valore di incertezza paragonabile all'errore che il radiometro commette quando la radiazione incide sulla sua area sensibile uniformemente da tutte le direzioni.

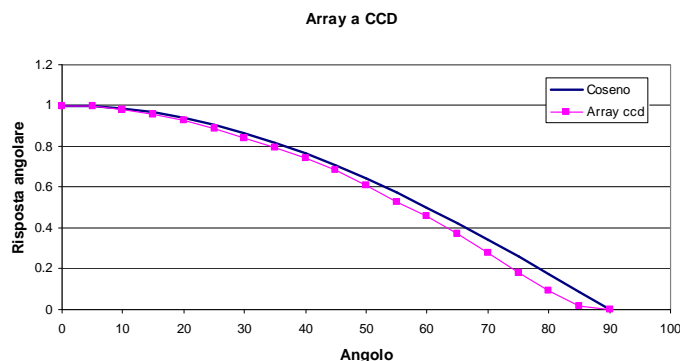
I valori di f_2 così calcolati sono riportati in tabella 1 e corrispondono all'incertezza di misura in condizioni geometriche differenti rispetto a quelle di taratura.

Spettroradiometri compatti ad array CCD

Gli spettroradiometri compatti ad array di CCD sono strumenti che permettono di effettuare misure spettrali. La taratura in lunghezza d'onda corregge le variazioni della risposta spettrale, permettendo la misura dell'irradianza spettrale in corrispondenza di ogni lunghezza d'onda con peso unitario. Tuttavia il fatto che la sensibilità degli array a CCD possa variare notevolmente nell'intervallo spettrale di funzionamento e in particolare sia molto bassa nell'UV, a causa del silicio impiegato come rivelatore, rende gli array a CCD molto sensibili alla luce parassita. Le misure di irradianza UVA e UVB possono quindi risultare poco attendibili soprattutto se l'emissione UV della sorgente è bassa (paragonabile alla stray light).

In merito alla risposta angolare è stata misurata analogamente a quanto fatto per i radiometri (figura 3) ed è stata valutata un'incertezza aggiuntiva associata alla deviazione dalla risposta ideale pari al 5%.

Figura 3 - Risposte angolari dello spettro radiometro ad array di CCD



RISULTATI

Determinate le caratteristiche di risposta della strumentazione sopra riportata, si sono confrontati i risultati delle misure effettuate su alcune sorgenti aventi differente spettro d'emissione con quelli ottenuti con lo spettroradiometro a scansione OL 756. L'ottica d'ingresso dello spettroradiometro è costituita da una sfera integratrice con apertura di diametro 1 cm. La risposta angolare è quindi prossima alla risposta ideale.

Le sorgenti misurate e i risultati delle misure e del confronto sono riportati in tab.3

Tabella 3 - Confronto tra strumenti per diverse sorgenti

Deuterio	Radiometro	Spettroradiometro	Differenza (%)	Fattore correttivo misurato	Fattore correttivo teorico
Radiometro UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	5.8	8.4	30.9%	1.45	1.4
Radiometro UVB[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	8.8	6.7	-30.5%	0.76	0.83
Radiometro UVE[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	17.6	12.8	-37.6%	0.72	0.82
Luxmetro [lx]	18.3	20.5	10.5%		
Array CCD VIS[lx]	17.9	20.5	12.7%		
Array CCD UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	7.0	8.4	17.0%		
Array CCD UVB [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	5.8	6.7	13.1%		
Alogena250W					
Radiometro UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	2.4	3.8	36.2%	1.58	1.64
Radiometro UVB[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	0.3	0.3	-19.6%	0.82	0.7
Radiometro UVE[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	0.2	0.2	1.6%	1.02	0.88
Luxmetro [lx]	330.6	312.0	-6.0%		
Array CCD VIS[lx]	301.0	312.0	3.5%		
Array CCD UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	8.1	3.8	-114.3%		
Array CCD UVB [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	3.2	0.3	-1053.6%		
Alogena 1000W					
Radiometro UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	55.6	93.1	40.2%	1.68	1.64
Radiometro UVB[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	9.9	6.8	-46.0%	0.68	0.7
Radiometro UVE[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	5.4	4.6	-15.3%	0.86	0.88
Luxmetro [lx]	7522.1	7900.0	4.8%		
Abbronzante					
Radiometro UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	550.2	679.0	19.0%	1.24	1.16
Radiometro UVB[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	20.9	10.0	-109.0%	0.48	0.49
Radiometro UVE[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	0.9	1.3	35.4%	1.55	1.44
Luxmetro[lx]	380.9	446.0	14.6%		

Arpa Piemonte – AIA - IRPA – QUINTO CONVEGNO NAZIONALE
 Il controllo degli Agenti Fisici: ambiente, salute e qualità della vita
 Novara 6-7-8 giugno 2012

Xe1000W	Radiometro	Spettroradiometro	Differenza (%)	Fattore correttivo misurato	Fattore correttivo teorico
Radiometro UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	36.0	51.5	30.0%	1.44	1.5
Radiometro UVB[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	16.4	12.0	-36.4%	0.73	0.77
Radiometro UVE[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	13.0	10.9	-19.0%	0.84	0.84
Luxmetro [lx]	642.0	646.0	0.6%		
Array CCD VIS[lx]	627.0	646.0	2.9%		
Array CCD UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	46.6	51.5	9.5%		
Array CCD UVB [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	11.9	12.0	1.5%		
Xe150W					
Radiometro UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	9.3	14.0	33.4%	1.51	1.5
Radiometro UVB[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	4.3	3.3	-30.3%	0.77	0.77
Radiometro UVE[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	3.9	3.1	-24.4%	0.8	0.84
Array CCD VIS[lx]	186.0	189.0	1.6%		
Array CCD UVA[$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	13.3	14.0	4.9%		
Array CCD UVB [$\mu\text{W}/\text{cm}^2$]	3.6	3.3	-9.2%		

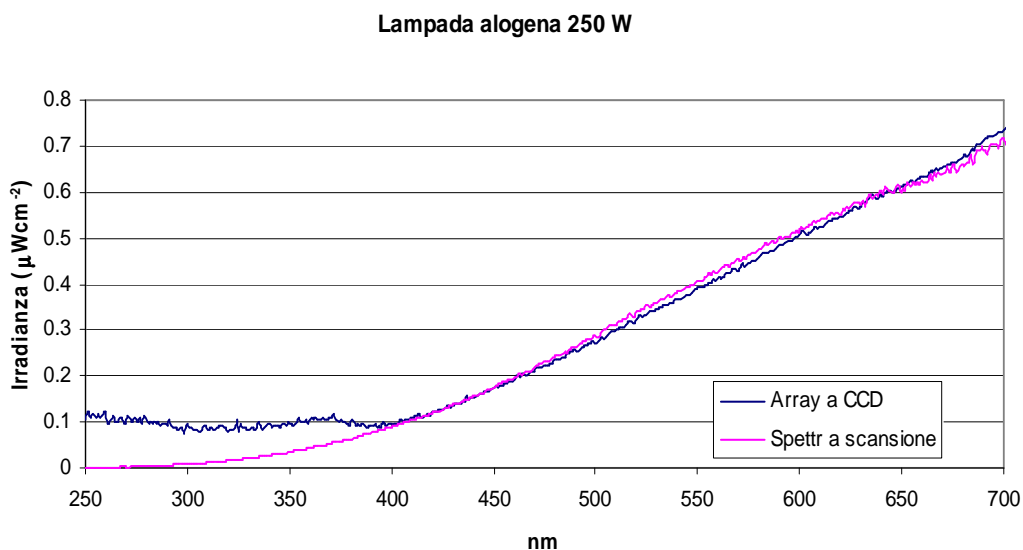
Per i radiometri si sono rilevate differenze generalmente inferiori a quelle associate alla deviazione della risposta angolare e di quella spettrale da quelle ideali (tab.1). Occorre evidenziare che le misure sono state condotte ad una distanza sufficientemente elevata, se confrontata con le dimensioni della sorgente, da poter assumere che la maggior parte della radiazione incida sulla superficie del sensore perpendicolarmente. In queste condizioni è la risposta spettrale non ideale la causa più importante dell'errore di misura commesso.

In merito ai fattori correttivi misurati si nota un buon accordo con quelli teorici, a dimostrazione della possibilità di correggere la misura radiometrica noto lo spettro di emissione della sorgente misurata. Osservando i dati relativi alla misura UVB e UVE della sorgente alogena a 250 W si nota una maggiore differenza tra fattore correttivo calcolato e fattore correttivo misurato rispetto a quelli ottenuti per la sorgente alogena da 1000W. Nel primo caso il segnale è molto basso e prossimo alla sensibilità dello strumento ($0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), per cui la maggiore differenza può essere dovuta alla non perfetta linearità di risposta degli strumenti. Inoltre per la sorgente al deuterio il fattore correttivo misurato è significativamente minore rispetto a quello calcolato, in quanto la misura spettrometrica è stata effettuata nell'intervallo spettrale compreso tra 250 e 400 nm mentre la sonda UVE rileva anche la radiazione emessa dalla lampada al deuterio per lunghezze d'onda inferiori a 250 nm.

Le misure effettuate con il luxmetro presentano un buon accordo con il riferimento, essendo sia la risposta spettrale sia quella angolare prossime a quelle ideali.

In merito all'array di CCD, le misure nell'intervallo spettrale del visibile sono sempre in accordo con quelle del riferimento. Si sono invece rilevate notevoli differenze nella misura della sorgente alogena nell'intervallo spettrale UVA e UVB a causa della luce parassita e della bassa emissione della sorgente (figura 4). Per le altre sorgenti, aventi emissione superiore, le differenze tra array a CCD e spettrometro non sono superiori al 20%.

Figura 4 - Confronto tra array a CCD e spettroradiometro



CONCLUSIONI

Gli strumenti attualmente più diffusi per la misura della radiazione ottica, soprattutto in relazione alla semplicità d'uso, alla rapidità di misura e al costo contenuto, sono i radiometri banda larga e gli spettroradiometri ad array di CCD. Dalle analisi effettuati su questi strumenti è emerso che le caratteristiche di risposta dei radiometri banda larga risultano significativamente differenti rispetto alle loro risposte ideali. In particolare le misure effettuate con i radiometri banda larga risultano affette da elevate imprecisioni nel caso in cui siano eseguite in condizioni differenti rispetto a quelle di taratura.

In laboratorio sono state valutate le caratteristiche di risposta di 3 radiometri (UVA,UVB,UVE) e di un luxmetro. La conoscenza di questi parametri ha permesso di valutare l'incertezza associata alla misura di sorgenti in condizioni operative diverse rispetto a quelle di taratura, in accordo alla norma CIE 53-1982. Sono state rilevate incertezze massime del 47% associate alla risposta spettrale e del 74% associate alla risposta angolare. Inoltre partendo dalle risposte spettrali dei radiometri misurate in laboratorio, si sono valutati i fattori correttivi da applicare alle misure radiometriche di alcune sorgenti.

Un discorso analogo è stato effettuato per uno spettroradiometro compatto ad array di CCD relativamente alla sola risposta angolare ed è risultata un'incertezza del 5%.

Con ognuno di questi strumenti, si sono quindi misurate le emissioni di alcune sorgenti e si sono confrontati i risultati con quelli ottenuti con uno spettroradiometro a scansione. Le differenze sono risultate in accordo con i dati di incertezza valutati sulla base della caratterizzazione in laboratorio. Per il luxmetro risultano contenute entro il 15%, mentre per i radiometri sono risultate generalmente superiori. La conoscenza dello spettro di emissione della sorgente permette comunque di valutare i coefficienti correttivi da applicare alla misura radiometrica. Questi fattori sono stati calcolati per tutte le sorgenti misurate e risultano in accordo con i dati sperimentali.

Per l'array di CCD, si è ottenuto un buon accordo con lo spettroradiometro nel visibile (entro il 13%), mentre nell'ultravioletto le differenze sono risultate talvolta notevoli, a causa della luce parassita.

I confronti effettuati hanno quindi evidenziato che, al fine di ottenere delle misure di radiazione ottica precise e accurate, occorre utilizzare uno strumento adeguato alla tipologia di sorgente e alle condizioni geometriche di misura. La conoscenza delle caratteristiche di risposta degli strumenti, ottenibile a partire da una analisi in laboratorio, permette comunque di stimare l'incertezza da associare al dato misurato e, noto lo spettro di emissione della sorgente, di valutare i fattori correttivi da apportare alla misura.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Dott. Paolo Ceccherini di Delta Ohm per le osservazioni e i suggerimenti formulati.

Bibliografia

International Commission on Illumination - *CIE 53-1982 Technical report – Methods of characterizing the performance on radiometers and photometers*, 1982

Larason T.C. Cromer C.L. – Sources of error in UV radiation measurements – Journal of research of the national Institute of Standards and Technology, 2001