

## **Interconfronto di strumentazione utilizzata nella valutazione del rischio da radiazioni ottiche artificiali in ambiente lavorativo**

Andrea Bogi (1), Iole Pinto (1), Nicola Stacchini (1), Alessandro Merlini (2), Alex Soldi (3)

(1) Laboratorio Agenti Fisici AUSL7-strada del Ruffolo Siena;

[a.bogi@usl7.toscana.it](mailto:a.bogi@usl7.toscana.it) , [i.pinto@usl7.toscana.it](mailto:i.pinto@usl7.toscana.it) , [n.stacchini@usl7.toscana.it](mailto:n.stacchini@usl7.toscana.it)

(2) CE.S.N.I.R. s.r.l.;

[a.merlino@cesnir.com](mailto:a.merlino@cesnir.com)

(3) ENI s.p.a

[alex.soldi@eni.com](mailto:alex.soldi@eni.com)

### **Riassunto**

L'obiettivo di questo lavoro è quello di iniziare un confronto metrologico fra gli strumenti utilizzati correntemente per le valutazioni del rischio da radiazioni ottiche sui luoghi di lavoro. Sono stati scelti due esemplari dello stesso radiometro a banda larga e due spettroradiometri di marca e modello differenti. Le differenze riscontrate nel valutare le emissioni di lampade alogene da parte dei due esemplari di radiometro a banda larga sono quasi sempre entro il 20%. Per quanto riguarda gli spettroradiometri le differenze sono più importanti e riguardano sia l'intensità della potenza emessa che l'individuazione degli eventuali picchi presenti nello spettro acquisito.

### **PREMESSA**

Il D.lgvo 81/08 Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro ha introdotto per la prima volta nel nostro Paese specifiche norme di tutela della salute per i lavoratori esposti a radiazioni ottiche artificiali (Titolo VIII capo V).

Nonostante che la presenza di elevati livelli di esposizione a tale tipologie di radiazione sia riscontrabile in numerose e diversificate attività lavorative, appare che la valutazione e prevenzione dei rischi per la salute e la sicurezza dei lavoratori associati a tali esposizioni sia stata in passato spesso trascurata. Le misure delle ROA negli ambienti di lavoro presentano allo stato attuale alcune criticità, legate alle tipologie di strumentazioni in commercio, che non sono in genere ottimizzate per l'impiego nel campo dell'igiene industriale, con problemi di artefatti in presenza di sorgenti molto intense, e, nel contempo, all'assenza di standard metrologici idonei a determinare l'incertezza di misura per diverse tipologie di metodiche utilizzate (1,2,3).

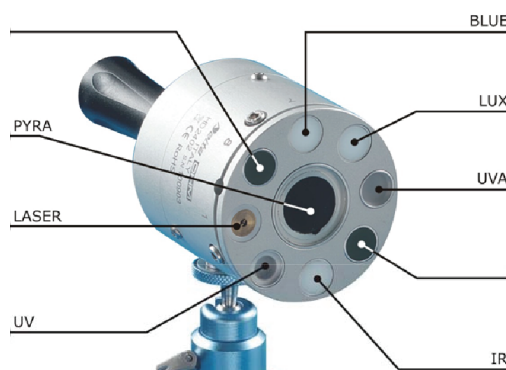
Il risultato di questa carenza è che misure eseguite con strumenti della stessa tipologia costruttiva possono dare risultati notevolmente diversi, in assenza di standard metrologici normalizzati utilizzati dal costruttore e di protocolli standardizzati di taratura (1,2).

I risultati riportati nel presente lavoro sono un esempio dello scarto riscontrabile nei risultati delle misure ottenute in condizioni sperimentali controllate utilizzando due esemplari dello stesso radiometro e due esemplari di spettroradiometri di marca e modello differenti.

### **STRUMENTAZIONE OGGETTO DEL CONFRONTO**

RADIOMETRO MARCA DELTA OHM MODELLO 2402

Figura 1 – Radiometro marca DELTAOHM modello 2402



Si tratta di un radiometro composto da 6 sonde differenti, nell'intervallo 220-2800 nm (specificare intervallo). Ogni sonda è costituita da un filtro ed un sensore ed è sensibile ad una regione differente dello spettro. La combinazione di queste sonde permette di stimare tutte le grandezze radiometriche necessarie a valutare il rischio da radiazioni ottiche come previsto dal d.lgs. 81/2008. Il programma proprietario oltre al calcolo delle irradianze efficaci relative alle grandezze radiometriche, permette, una volta inseriti i dati geometrici della sorgente, di calcolare le radianze per i danni retinici (luce blu e danno termico) ed infine dal confronto con i limiti normativi stima i tempi di esposizione massimi.

#### SPETTRORADIOMETRI

Si sono analizzati i seguenti spettroradiometri:

1) Marca JETI, modello SPECBOS 1211 UV. Si tratta di uno spettroradiometro a singolo reticolo, con possibilità di effettuare sia misure di radianza che di irradianza.

Figura 2 - Spettroradiometri analizzati: a sinistra il modello SPECBOS 1211 UV della JETI, a destra il modello HR 4000 della OCEAN OPTICS, completo di fibra ottica e sorgente di calibrazione.



2) Marca OCEAN OPTICS, modello HR 4000 prodotto dalla. Acquisisce la radiazione tramite fibra ottica. Questo strumento viene venduto con la relativa sorgente di calibrazione e viene consigliato di utilizzarla ogni volta che si collega la fibra ottica.

Le caratteristiche principali dei due strumenti sono riassunte nella tabella 1.

Tabella 1 - Caratteristiche dei due spettroradiometri analizzati.

	SPECBOS 1211 UV	HR 4000
Intervallo spettrale (nm)	250 ... 1000	200 ... 1100
Pixels sensore	2048	3648
Risoluzione ADC	16bits (usati 15bits)	14bits
Tempo d'integrazione	1ms ...	3,8ms ... 10 sec
Risoluzione	1nm	<1nm, dipendente da settaggio

## RISULTATI

### a) CONFRONTO TRA RADIOMETRI A BANDA LARGA

I due radiometri marca Deltaohm, modello 2402 oggetto del confronto sono stati acquisiti nello stesso anno (2010) dalla ASL 7 di Siena (DUSL) e dalla ditta CESNIR (DCES).

Le prove di interconfronto sono state effettuate utilizzando come sorgenti di riferimento due lampade alogene: una lampada di calibrazione modello OL220C, marca Gooch & Housego, potenza 200W (OL) il cui spettro dichiarato dal produttore è riportato in figura 3 ed una lampada modello Haloline 64701 marca OSRAM, potenza 300W (HA). Il supporto utilizzato per sostenere le lampade è tale da minimizzare eventuali riflessioni, in modo che la radiazione in arrivo sui sensori provenga direttamente dalla sorgente. I radiometri sono stati posizionati fianco a fianco in modo da risultare alla stessa distanza dalla sorgente; ciascun radiometro è stato orientato verso la sorgente utilizzando il puntatore laser interno e collegato ad un pc per l'acquisizione.

Fig. 3: Spettro dichiarato dal produttore della lampada per calibrazione OL220C.



Si riportano di seguito i risultati di misura ottenuti in contemporanea dai radiometri sulle due sorgenti.

Ai fini dell'interconfronto sono state presi in esame i valori delle irradianze efficaci rilevate nelle differenti bande spettrali, su cui si basa il calcolo degli indicatori di rischio prescritti dalla normativa e riportati in tabella 2 alla colonna "grandezza": essi rappresentano il primo stadio di elaborazione del programma in dotazione dello strumento.

Pertanto appare logico ipotizzare che le differenze riscontrabili nei risultati di misura siano imputabili unicamente a differenze nel sistema di filtraggio analogico e di sensibilità dei fotodiodi impiegati da ciascuno strumento, considerando che non sussistano differenze dovute agli algoritmi di calcolo delle radianze e dei tempi di esposizione eseguite dal software, essendo lo stesso nei due strumenti presi in esame.

Tabella 2: Confronto fra le irradianze efficaci stimate dai due radiometri, lampada utilizzata OL.

Distanza (cm)	Grandezza	Radiometro DUSL (W/m <sup>2</sup> )	Radiometro DCES (W/m <sup>2</sup> )	Differenza percentuale
35	UV (a)	24.52E-3	28.68E-3	-17%
35	UVA (b)	341.0E-3	287.0E-3	16%
35	Blu (c,d)	2.093	1.793	14%
35	IR+Vis (g,h,i)	47.33	39.97	16%
35	IRA (j,k,l)	33.04	27.59	16%

35	Skin (m,n,o)	160.0	145.0	9%
50	UV (a)	13.4E-3	15.48E-3	-16%
50	UVA (b)	178.0E-3	160.0E-3	10%
50	Blu (c,d)	1.198	1.035	14%
50	IR+Vis (g,h,i)	27.14	23.19	15%
50	IRA (j,k,l)	18.98	16.07	15%
50	Skin (m,n,o)	96	80	17%
100	UV (a)	3.685E-3	4.275E-3	-16%
100	UVA (b)	51.00E-3	46.00E-3	10%
100	Blu (c,d)	426.5E-3	359.5E-3	16%
100	IR+Vis (g,h,i)	9.109	7.662	16%
100	IRA (j,k,l)	6.062	5.090	16%
100	Skin (m,n,o)	36.00	16.00	56%

Tabella 3: Confronto fra le irradianze efficaci stimate dai due radiometri, sorgente utilizzata HA.

Distanza (cm)	Grandezza	Radiometro DUSL (W/m <sup>2</sup> )	Radiometro DCES (W/m <sup>2</sup> )	Differenza percentuale
35	UV (a)	11.74E-3	13.29E-3	-13%
35	UVA (b)	222.8E-3	213.0E-3	4%
35	Blu (c,d)	1.902	1.620	15%
35	IR+Vis (g,h,i)	57.00	49.16	14%
35	IRA (j,k,l)	47.50	41.23	13%
35	Skin (m,n,o)	257.0	247.7	4%
100	UV (a)	1.750E-3	2.009E-3	-15%
100	UVA (b)	36.50E-3	33.00E-3	10%
100	Blu (c,d)	324.6E-3	277.6E-3	15%
100	IR+Vis (g,h,i)	10.11	8.416	17%
100	IRA (j,k,l)	8.589	7.054	17%
100	Skin (m,n,o)	51.00	30.00	41%

### CONFRONTO FRA DUE SPETTRORADIOMETRI A SINGOLO RETICOLO

In questa sezione si presentano i risultati del confronto fra i modelli SPECBOS 1211 UV (SP) e HR 4000 (HR). La sorgente OL220C (vedi paragrafo precedente) è stata acquisita in parallelo dai due strumenti a 4 distanze differenti: 25cm, 50cm, 75cm, 90cm. In figura 4 si vedono gli spettri ottenuti dai due strumenti acquisendo la sorgente ad una distanza di 50cm. Come si vede l'irradianza spettrale misurata con SP è sistematicamente più elevata di quella misurata con HR. Nella zona del visibile i risultati sono abbastanza concordi, mentre agli estremi dello spettro acquisito la differenza tende ad aumentare con un andamento diverso e ripetibile: nella parte infrarossa è evidente una differenza sistematica ed i due spettri sono piuttosto regolari; mentre per lunghezze d'onda inferiori a 400nm, ad una differenza sistematica si aggiungono delle fluttuazioni sempre maggiori (specialmente nello spettrometro HR) dovute probabilmente al numero troppo basso dei conteggi nei canali corrispondenti a questa regione.

Confrontando i grafici con l'andamento dello spettro dichiarato dal produttore e riportato in fig 3 si vede che la lunghezza d'onda del massimo registrato dallo spettrometro SP è più vicina a quella dello spettro dichiarato di quella registrata dall'altro spettrometro. Quindi la diminuzione d'intensità registrata da HR per lunghezze d'onda maggiori di circa 780nm non corrisponde allo spettro

dichiarato, possibili cause potrebbero essere una non corretta calibrazione o una non linearità troppo marcata nella risposta di questo gruppo di canali.

Figura 4 - Confronto fra gli spettri della sorgente OL220C, acquisiti dai due spettroradiometri alla distanza di 50cm

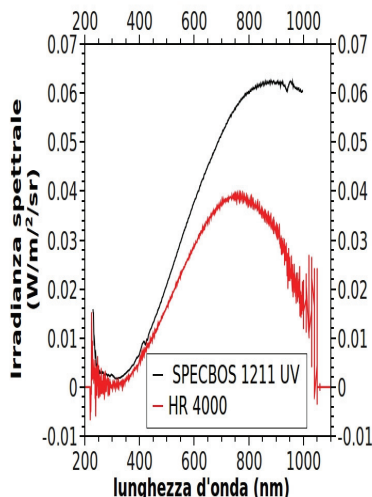
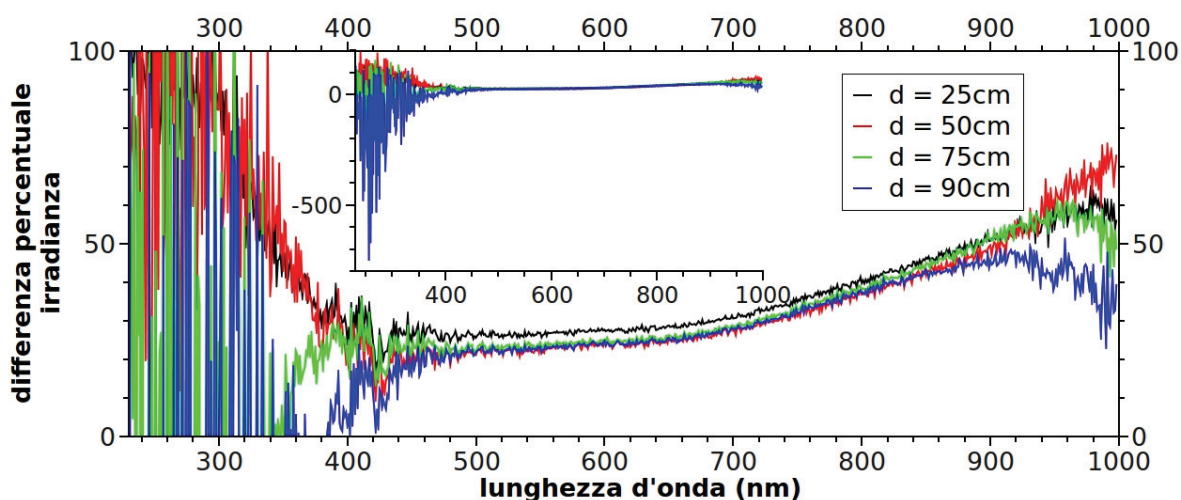


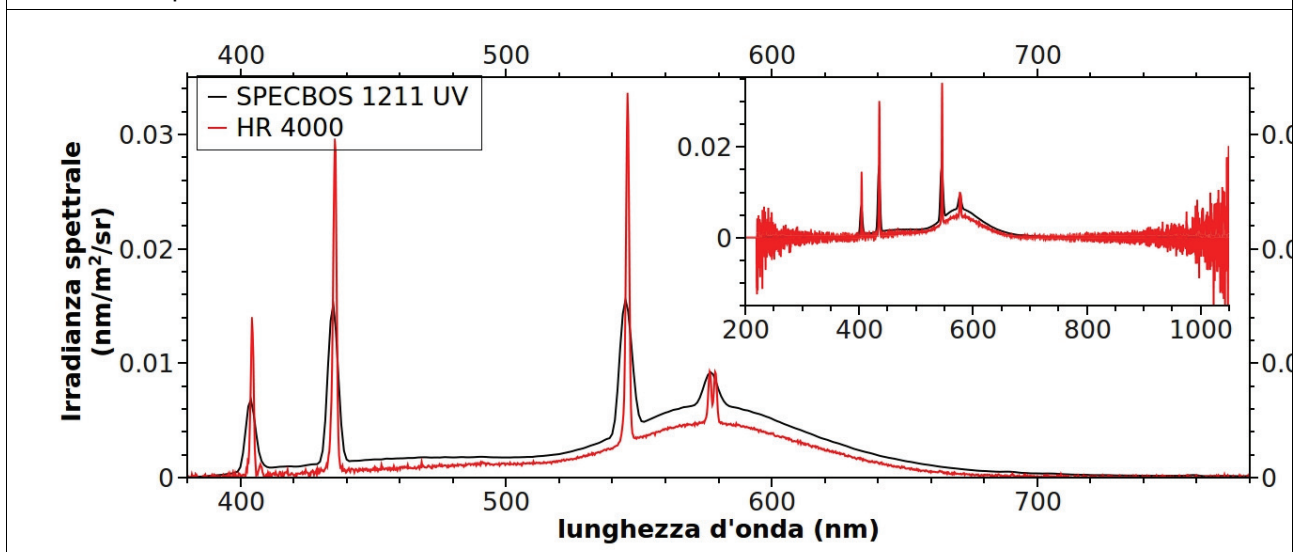
Figura 5 - Differenze percentuali fra le misure di irradianza spettrale ottenute con i due spettroradiometri acquisendo la sorgente OL220C a varie distanze.



Per quantificare gli scostamenti osservati in figura 4, in figura 5 sono riportate le differenze percentuali ottenute dalle misure di irradianza spettrale posizionando la sorgente a diverse distanze. Si conferma una differenza sistematica fra i risultati dei due strumenti che si mantiene abbastanza costante a tutte le distanze. Nella regione 400nm-700nm la differenza è inferiore al 30%; nella parte dell'infrarosso arriva al 50%, mentre nella regione degli ultravioletti si raggiungono valori anche del 500% a causa delle fluttuazioni precedentemente discusse.

Il secondo confronto fra i due strumenti è stato eseguito acquisendo le emissioni di una lampada a fluorescenza per illuminazione marca General Electric modello F36W/33. Anche in questo caso i valori di irradianza spettrale misurata con SP risultano quasi sempre maggiori dei corrispondenti misurati con HR (vedi figura 6). Come si può notare i picchi registrati da HR sono più stretti e più alti di quelli registrati con SP.

Figura 6 - Confronto fra gli spettri ottenuti con i due spettroradiometri acquisendo una lampada a fluorescenza per illuminazione marca General Electric modello F36W/33



In tabella 4 sono riportati i dati del picco a 545nm estrapolati dai due grafici. Nonostante la forma del picco sia differente, le aree differiscono del 23% in favore del picco registrato da SP. Questo scostamento è lo stesso che si può ricavare anche dal grafico in figura 5 precedentemente analizzato a questa lunghezza d'onda. Ciò significa che se i due strumenti avessero la stessa risposta in energia (cioè se una curva regolare come quella di fig. 4 fosse risultata completamente sovrapposta) le aree dei due picchi avrebbero coinciso.

La differenza nella forma dello spettro acquisito sembra quindi da attribuirsi ad una differente distribuzione delle energie nei vari canali. Probabilmente lo spettroradiometro SP ha uno stray-light maggiore dell'altro strumento, quindi la radiazione che dovrebbe incidere su un canale si disperde su quelli limitrofi.

Tabella 4 - Parametri relativi al picco a 545 nm presente nei grafici di fig. 6 , estrapolati dalle irradianze spettrali misurate con i due spettroradiometri

parametro	SPECBOS1211 UV	HR 4000
Lunghezza d'onda del massimo (nm)	545	545,8
Larghezza alla base (nm)	11	5,7
Altezza netta (W/m <sup>2</sup> /nm)	0,011	0,03
Area (W/m <sup>2</sup> )	0,061	0,047

Si sono infine confrontate le risposte dei due strumenti con il radiometro della DeltaOhm analizzato nel paragrafo precedente.

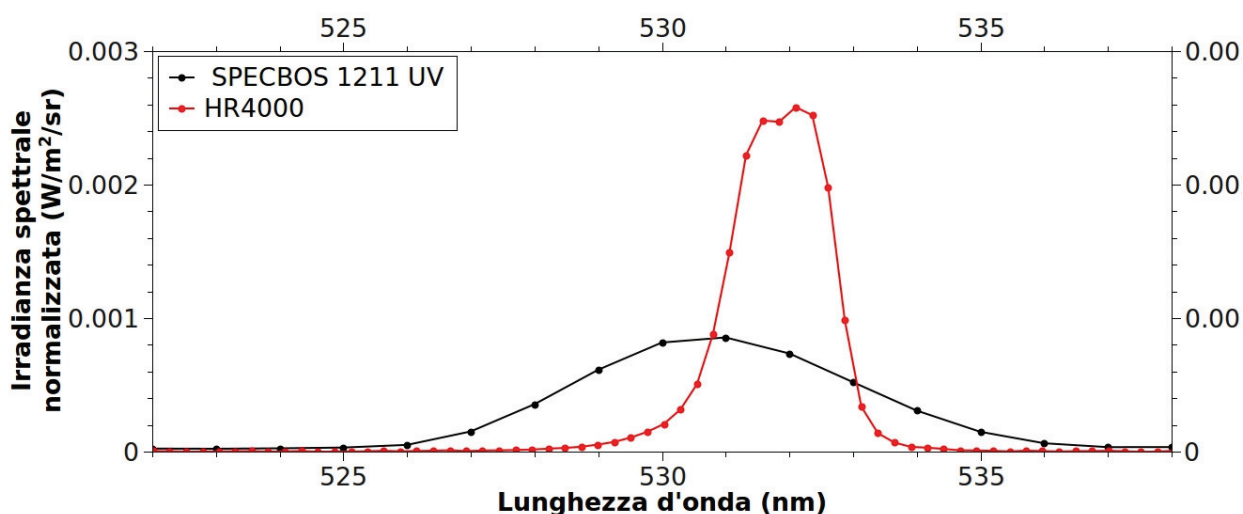
Tabella 5 – Confronto fra le irradianze efficaci per i danni considerati nel dlgs. 81/08 ricavati dalle misure effettuate su una lampada a fluorescenza modello F36W/33 alla distanza di 50cm, con gli spettrometri SP e HR e con il radiometro della DeltaOhm

parametro	DeltaOhm	SP	SP/DO	HR	HR/DO
$E_{eff}$ (W/m <sup>2</sup> )	0	0,002	Inf.	-0,7	Inf.
$E_{UVA}$ (W/m <sup>2</sup> )	0	0,006	Inf.	-0,003	Inf.
$E_B$ (W/m <sup>2</sup> )	0,217	0,16	74%	0,099	46%
$E_R$ (W/m <sup>2</sup> )	2,328	2,3	99%	1,5	64%

Per fare ciò agli spettri relativi alla lampada a fluorescenza per illuminazione sono state applicate

le ponderazioni previste per ottenere le irradianze efficaci dei danni oculari e alla pelle descritte nel dlgs. 81/08 e si sono confrontate con la risposta del radiometro. I risultati sono riportati in tabella 5. Per analizzare meglio il diverso comportamento dei due spettroradiometri nell'acquisire spettri con picchi stretti, è stata acquisita la riflessione di un puntatore laser verde (532nm) su una superficie bianca. Si è preferito acquisire la riflessione per limitare la potenza sui sensori in modo da non rischiare di saturarli. In fig. 7 la curva nera rappresenta lo spettro ottenuto con SP, la curva rossa è stata ottenuta dall'acquisizione con HR scalata in modo da rendere uguali le aree dei picchi. In questo modo risulta più evidente la differenza di allargamento delle due curve. Quella acquisita con HR (curva rossa) inoltre sembra formata da 2 gaussiane parzialmente sovrapposte.

Figura 7 - Spettri ottenuti con gli spettroradiometri acquisendo la riflessione su una superficie bianca di un puntatore laser a 532nm



Eseguendo dei fit con una gaussiana per la curva nera e due gaussiane per quella rossa, si ottengono i valori per centro e larghezza mostrati in tabella 6.

Tabella 6 – Risultati dei fit rispettivamente con una e due gaussiane degli spettri ottenuti con SP e HR mostrati in figura 7

parametro	SPECBOS1211	HR 4000	
		Gauss 1	Gauss 2
Lunghezza d'onda centro (nm)	530,8	531,7	532,5
Larghezza (nm)	4,1	1,3	0,6

Resta quindi confermata la maggiore capacità di HR nel risolvere i picchi stretti presenti nello spettro.

## DISCUSSIONE

### a) CONFRONTO TRA RADIOMETRI A BANDA LARGA

Non prendendo in esame i risultati inerenti la sonda relativa al parametro Skin (m,n,o), si può dire che gli scarti percentuali nei risultati delle misure effettuate con i due strumenti sono in generale dell'ordine del 10-15%.

Dall'analisi dei risultati appare che gli scarti di misura siano prevalentemente di tipo sistematico, mentre la componente stocastica risulta meno rilevante: ciò in quanto lo scarto percentuale di misura ottenuto su ogni grandezza risulta essere - con buona approssimazione - costante, sia al



variare della distanza, mantenendo fissa la sorgente, sia al variare della sorgente.

La causa degli scarti sistematici riscontrati potrebbe pertanto essere ragionevolmente imputabile una differenza nel fattore di calibrazione dei fotodiodi in dotazione di ciascuno strumento.

I risultati ottenuti per il parametro Skin (m,n,o) sono invece di più complessa interpretazione. Infatti, fissata la sorgente, gli scarti di misura non sono costanti con la distanza; gli scarti invece presentano maggiore ripetibilità al variare della sorgente. Tale comportamento farebbe ipotizzare che le due sonde presentino diverse curve di risposta alla potenza.

E' comunque da tener presente che - per valori confrontabili con i limiti di legge stabiliti per  $E_{IR}$  (irradianza fra 780nm e 3000nm) – pari  $100 \text{ W/m}^2$  - la differenza riscontrata tra le due sonde è minore del 20%.

Tabella 7 – Definizione di alcune grandezze dosimetriche qui utilizzate, estratte dall'allegato XXXVII del dlgs. 81/08.

a)	$E_{\text{eff}} = \int_{\lambda=180 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda$	$H_{\text{eff}}$ è pertinente solo nell'intervallo da 180 a 400 nm
b)	$E_{\text{UVA}} = \int_{\lambda=315 \text{ nm}}^{\lambda=400 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda$	$H_{\text{UVA}}$ è pertinente solo nell'intervallo da 315 a 400 nm
e), f)	$E_B = \int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{\lambda=700 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda$	$E_B$ è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 700 nm
g), l)	$E_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda}(\lambda) R(\lambda) \cdot d\lambda$	(Cfr. tabella 1 1.1 dell'allegato per i valori $\lambda_1$ e $\lambda_2$ )
m), n)	$E_{\text{IR}} = \int_{\lambda=780 \text{ nm}}^{\lambda=3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda$	$E_{\text{IR}}$ è pertinente solo nell'intervallo da 780 a 3 000 nm
o)	$E_{\text{skin}} = \int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{\lambda=3000 \text{ nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda$	$H_{\text{skin}}$ è pertinente solo nell'intervallo da 300 a 3 000 nm

## b) CONFRONTO TRA SPETTRODIOMETRI

I risultati delle misure ottenute con gli spettroradiometri presentano scarti rilevanti, che si traducono in differenze nelle grandezze da confrontare con i limiti di legge fino al 60-70%

Le variabilità riscontrate sono principalmente imputabili alla differenti risposte in energia e ad artefatti da stray light dei due strumenti.

I risultati ottenuti dal presente studio confermano la necessità ed urgenza di sviluppare protocolli di taratura e standard metrologici normalizzati per costruttori ed utilizzatori di strumentazioni di misura delle radiazioni ottiche per poter effettuare misure con un accettabile livello di incertezza in ambito igienistico (1,2) e garantire l'adozione di appropriate misure di tutela per i lavoratori esposti.

## Bibliografia

1. UNI CEI ENV 13005 – Guida all'espressione dell'incertezza di misura
2. UNI CEI EN/IEC 17025 – Requisiti generali per la competenza dei Laboratori di prova e Taratura.
3. BARLIER-SALSI A., SALSI S, *Mesures des rayonnements optiques*

*aux postes de travail : comparaison de différentes méthodes et matériels de mesure*  
 , 2010 Radiation Protection Vol. 45, N 3



