

ILLUMINAZIONE A LED E RISCHIO FOTOBIOLOGICO: COSA SAPPIAMO E COSA CREDIAMO DI SAPERE

Francesco Frigerio (1), Luisa Biazzi (2)

(1) ICS Maugeri Spa - Centro Ricerche Ambientali - Pavia

(2) Università di Pavia - Fisica medica e radioprotezione

Introduzione

Abbiamo visto spesso che rischi da agenti fisici individuati nel luogo di lavoro, portano più o meno velocemente a prendere consapevolezza della possibile esistenza di un pericolo anche per la popolazione generale con la conseguente fissazione di normative e misure cautelative.

Questo processo si è verificato per il rumore nell'ambiente di lavoro, che ha portato poi a introdurre le norme sull'inquinamento acustico e si sta verificando, forse in modo meno consapevole e ordinato per l'esposizione a microonde.

L'International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) ha emanato le sue linee guida per i campi elettromagnetici fino a 300 GHz nel 1998, ma è solo con la diffusione di massa della telefonia mobile dopo gli anni '10 che nel pubblico si è diffusa la consapevolezza, più o meno fondata, della possibile esposizione della popolazione.

Un fenomeno simile si sta verificando per il rischio fotobiologico da radiazioni ottiche artificiali che sembra preoccupare il pubblico prevalentemente in relazione all'illuminazione a led.

Al fine di valutare il rischio fotobiologico di lampade e sistemi di lampade è stato emanato uno specifico standard CEI EN 62471:2009 che classifica tali sorgenti in 4 gruppi (4 classi di rischio) riportate in Tabella V). Questa norma prevede metodi di misura e classificazione e, anche se non definisce vincoli specifici per la marcatura, rappresenta attualmente lo stato dell'arte in termini di informazioni sulla sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampade (compresi i LED).

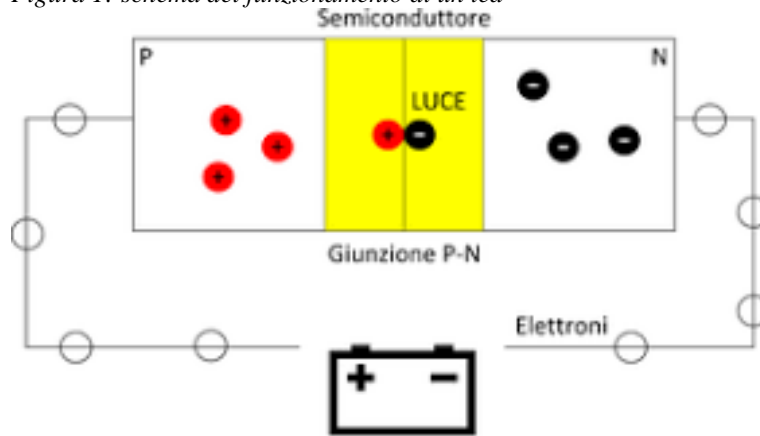
Allo stato attuale le norme IEC/CEI di sicurezza specifiche per ciascuna tipologia di sistema di illuminazione sono in corso di adeguamento per recepire i criteri di

sicurezza fotobiologica e garantirne un utilizzo sicuro in relazione al rischio oculare, così come è in passato avvenuto per i sistemi Laser.

Il led, dalle iniziali inglesi per diodo a emissione luminosa, può essere schematizzato come in Figura 1. Un diodo a stato solido è costituito da due strati di materiale semiconduttore con drogaggio diverso.

Nello strato identificato come N si produce una sovrabbondanza di portatori di carica negativi, ovvero elettroni. Nello strato P si genera, sempre mediante opportuno drogaggio del materiale, una certa concentrazione di aree con carenza di elettroni rispetto alla configurazione neutra. Queste aree si comportano come portatori di carica positiva, sono definite in lingua italiana “lacune” o, più spesso “buche”, traduzione del termine inglese hole.

Figura 1: schema del funzionamento di un led



Per effetto del drogaggio c'è una differenza di energia ΔE tra i due strati N e P, tipica dello specifico semiconduttore.

Quando il diodo è polarizzato come in figura, gli elettroni sono attratti verso la giunzione e spinti a neutralizzare un certo numero di lacune.

Il ricongiungimento elettrone-buca comporta un passaggio di corrente ma anche l'emissione di un fotone di lunghezza d'onda corrispondente al salto energetico

$$\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1)$$

dove h e c sono la costante di Planck e la velocità della luce.

La luce emessa rientra in un intervallo relativamente stretto intorno alla lunghezza d'onda propria del dispositivo.

In generale non è possibile, fatti salvi i processi che provocano un allargamento della riga, l'emissione di luce a lunghezza d'onda minore rispetto a quella intrinseca del dispositivo.

Per alcuni anni i led sono stati piccoli oggetti a bassa emissione luminosa con lunghezza d'onda minima corrispondente al giallo; utilizzati prevalentemente come indicatori di stato delle apparecchiature.

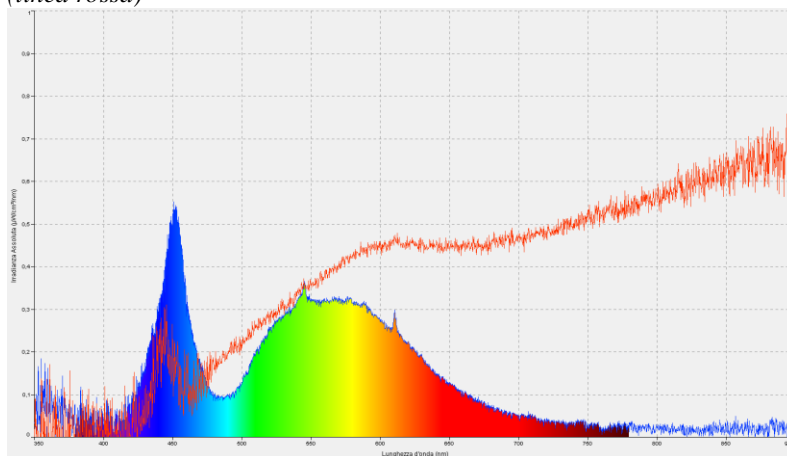
Il vero salto tecnologico si è verificato quando è stato possibile realizzare diodi con emissione nel blu e con un adeguato flusso luminoso.

La luce bianca è divenuta così realizzabile a partire da un led blu ricoperto da uno strato di materiale fluorescente che genera le componenti verdi e rosse.

Nella Figura 2, lo spettro di un led a luce bianca (linea blu) è confrontato con quello di una lampada alogena.

Si evidenzia, tra l'altro, che la lampada alogena emette una significativa frazione di energia nell'infrarosso.

Figura 2: confronto fra un led a luce bianca (linea blu), e una lampada alogena (linea rossa)



Il successo dell’illuminazione a led è dovuto, in larga parte, alla possibilità di produrre sorgenti di elevata brillantezza con basso consumo elettrico.

Nella Tabella I sono confrontate le prestazioni tipiche di diverse sorgenti luminose.

Il flusso luminoso, espresso in lumen (lm), è la grandezza che divisa per la superficie si definisce illuminamento, espresso in lux.

Tabella I: prestazioni tipiche di diverse tipologie di sorgente

Tipo di lampada	Consumo di energia W	Flusso luminoso lm	Efficienza luminosa lm/W
LED	6	470	78
Fluorescente (elettronica interna)	18	1100	61
Alogena	30	405	14
Alogenuri metallici (industriale)	35	3700	106

L’illuminamento può essere rappresentato come irradianza, ovvero energia incidente per unità di superficie, pesata sulla curva di sensibilità dell’occhio alla luce diurna (sensibilità fotopica).

$$E_{lux} = 683 \int_{\lambda=380}^{\lambda=730} E(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

Il fattore 683 serve a normalizzare all’unità di flusso luminoso.

La Tabella I mostra come con i led sia possibile ottenere un’efficienza luminosa confrontabile con quella delle lampade ad alogenuri metallici che hanno comunque costi notevoli e non si prestano per applicazioni domestiche.

L’Agence Nationale de Sécurité sanitaire de l’alimentation, de l’Environnement et du travail (ANSES), ente francese per la sicurezza sul lavoro, ha emanato nel 2010 e successivamente aggiornato nell’aprile 2019 [2] un parere “sugli effetti sulla salute umana e sull’ambiente” dei sistemi a led.

I possibili effetti sanitari individuati sono legati essenzialmente a due fenomeni:

- la presenza di luce blu;
- la modulazione temporale della luminanza.

Il rischio da luce blu, secondo le linee guida ICNIRP, recepite nella Direttiva 2006/25/CE [1] e di conseguenza nel D.Lgs 81/08 Titolo VIII Capo V e Allegato XXXVII, viene valutato mediante la grandezza

$$L_B = \int_{\lambda=380nm}^{\lambda=700nm} L(\lambda)B(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

rimandando ai riferimenti per dettagli e definizioni, si ricorda che la radianza L è legata all'irradianza E dalla relazione

$$L = \frac{E}{\omega} \quad (4)$$

dove ω è l'angolo sotto il quale viene osservata la sorgente.

Il rischio pertanto aumenta quanto più la sorgente è puntiforme e lo spettro spostato verso il picco dello spettro d'azione $B(\lambda)$, intorno a 440 nm.

Al fine di prevenire il danneggiamento fotochimico della fovea (regione centrale della retina), per tempi di esposizione $t < 10000$ s (circa 2 ore e mezza), il limite è rispettato se $L_B < 10^6/t$ W/m²*sr, oltre i 10000 s di esposizione deve essere $L_B < 100$ W/m²*sr

Altri effetti della luce blu sarebbero legati al fatto che questa componente dello spettro è tipica della luce diurna; come possibile conseguenza, un'eccessiva esposizione a luce blu nel periodo notturno potrebbe comportare negli uomini ma anche in piante e animali, alterazioni dei cicli fisiologici naturali, tipicamente, il ritmo sonno-veglia.

Ulteriori effetti, forse meno studiati, sono quelli legati alla modulazione temporale della luce.

Considerando la Figura 1, è evidente che se collegato direttamente alla rete di alimentazione, il led può emettere luce solo durante una delle due semionde di cui è costituita la sinusoide a 50 Hz.

L'alimentazione del led con corrente continua è in molti casi ottenuta approssimativamente, tipicamente invertendo una delle due semionde.

L'occhio umano è in grado di percepire variazioni a frequenza inferiore a 20 Hz ma anche fino a 100 Hz, (e oltre in soggetti predisposti). Lo sfarfallamento della luce, o flickering può provocare sensazioni di malessere, mal di testa e, nei casi più gravi scatenare convulsioni e attacchi epilettici [3].

L'indice più diffuso per valutare questo rischio è quello introdotto dall' Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) che per una sorgente di intensità I , è definito

$$M_{\%} = 100 * \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (5)$$

La norma IEEE 1789-2015 raccomanda i seguenti valori, dipendenti dalla frequenza f :

$$M_{\%} < 0,025 * f, \text{ per } f < 90 \text{ Hz}$$

$$M_{\%} < 0,08 * f \text{ per } 90 \leq f < 1250 \text{ Hz}$$

Per frequenze > 1250 Hz, non si ritengono necessarie restrizioni sulla modulazione.

In questo lavoro, abbiamo confrontato diverse sorgenti a led, sia per impiego civile sia per l'illuminazione industriale, con attenzione ai metodi di valutazione più pratici.

Materiali e metodi

Un primo problema è quello della valutazione dello spettro della sorgente con riferimento alla componente della luce blu.

Per questo lavoro, tutte le sorgenti sono state sottoposte a misura dell'irradianza spettrale $E(\lambda)$ mediante spettrometro Ocean Optics HR4000.

La radianza è stata ricavata successivamente conoscendo l'angolo solido sotteso mediante la (4) e gli integrali (2) e (3) sono stati ricavati in post-elaborazione.

Per valutare la quantità di luce blu generata dalla sorgente, è utile calcolare il rapporto di luce blu $R_B = \frac{E_B}{I_{lum}}$. Esprimendo tale rapporto in $\frac{W}{m^2 \cdot klux}$ si ottiene una grandezza adimensionale compensata, dal punto di vista numerico per il fattore 683 che compare nella (2).

Si evidenzia che il rischio retinico fotochimico è valutato dalla radianza (3) che tiene conto dell'angolo sotteso mentre il rapporto E_B/lux valuta semplicemente la quantità di luce blu emessa.

Un indice molto popolare per esprimere lo stesso concetto, e relativamente semplice da interpretare, è la temperatura comparata di colore (CCT) o più comunemente temperatura di colore.

Per definizione, la CCT è la temperatura in °K di un corpo nero che fornisce la stessa sensazione cromatica della sorgente in esame.

Per una distribuzione di corpo nero infatti vale la relazione

$$\lambda \cdot T = w \quad (6)$$

con $w = 0,00289 \text{ m} \cdot \text{°K}$ e λ lunghezza d'onda corrispondente al picco della distribuzione spettrale.

Pertanto, al crescere della temperatura, il picco della distribuzione si sposta verso il blu.

Il sole genera una luce assimilabile ad un corpo nero a 6000 °K; in effetti le lampade vendute oggi riportano, oltre al flusso luminoso in lm, anche un valore di CCT.

Il confronto fra le due curve della Figura 2, mostra come non sia affatto garantito che la CCT sia un parametro idoneo a valutare una sorgente a led.

Il calcolo della CCT a partire dallo spettro richiede un procedimento abbastanza complesso da descrivere in questa sede [4].

Per questo lavoro, è stato scelto il procedimento semplificato di Mc Camy [5], che richiede di calcolare le coordinate cromatiche x e y pesando lo spettro con le curve definite dalla Commission Internationale d'Eclairage (CIE) e ricavando il parametro

$$n = \frac{x - 0,3320}{0,1858 - y} \quad (7)$$

da qui

$$CCT = 449 \cdot n^3 + 3525 \cdot n^2 + 6823,3 \cdot n + 5520,33 \quad (8)$$

La modulazione M% è stata invece misurata con un fotodiodo Electro Optics ET2000 accoppiato ad un oscilloscopio digitale Good Will Instek GDS-2104.

Risultati

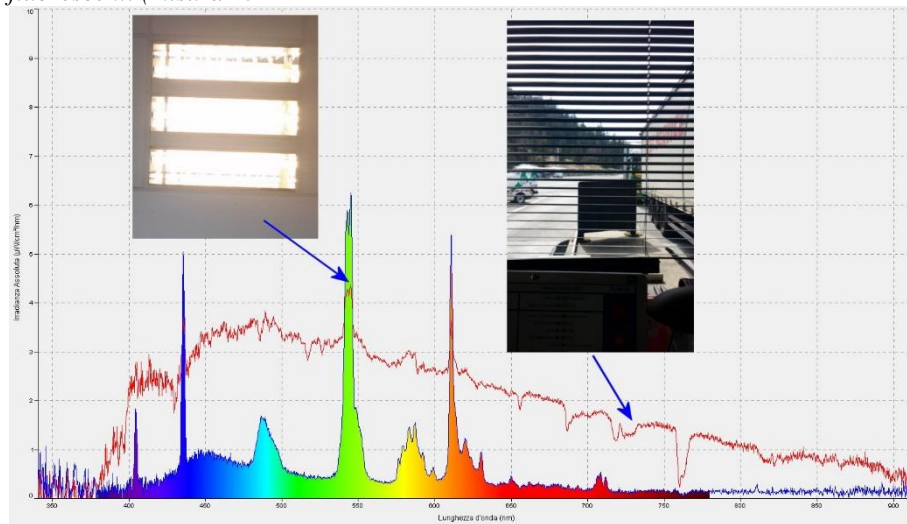
Nella Tabella II sono riportati i risultati delle misure spettrali.

Sono evidenziate in giallo le misure per le quali il valore di L_B è tale da non consentire la visione a tempo indeterminato.

Tutte le sorgenti evidenziate in giallo sono sorgenti a led, ma non tutte le sorgenti a led superano il limite per L_B , e la maggior parte di esse per tempi superiori a 1 ora di osservazione, del tutto compatibili con ambienti industriali purchè l'installazione sia fuori dal campo visivo della postazione di lavoro.

Nella stessa tabella sono riportati numerosi esempi di sorgenti con rapporti di luce blu elevati diverse dai led, compresa la luce naturale.

Figura 3: confronto fra la luce naturale (misura 12) e illuminazione a tubi fluorescenti (misura 13)



Nella Figura 4 è illustrato il faro a led di cui alla misura 4: per superare il limite per L_B sarebbe necessario fissare il faro per focalizzarne l'immagine sulla fovea per un tempo superiore a 1 ora e mezza.

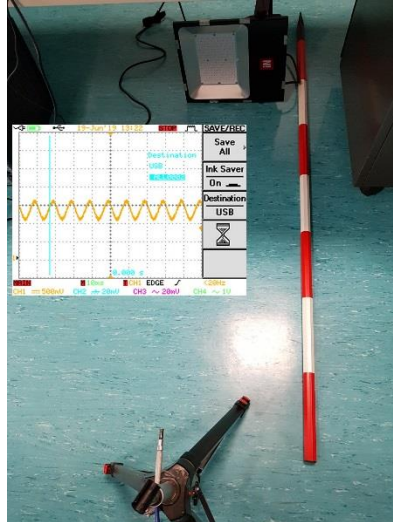
All'immagine è sovrapposta la misura con l'oscilloscopio che evidenzia una modulazione alla frequenza di 100 Hz.

Tabella II: misure eseguite mediante spettroradiometro

Misura	Sorgente	Illuminamento lux	Irradianza pesata E_b W/m^2	Radianza da luce blu $W/m^2 \cdot sr$	Tempo massimo di osservazione per rispettare il limite per luce blu s	Rapporto di luce blu $W/m^2 \cdot klux$	Temperatura di colore comparata $^{\circ}K$
1	Led stradale, osservazione laterale in galleria	521	0,28	3,0	> 2,5 h	0,532	3385
2	Led stradale durante manutenzione	2602	1,16	58,0	> 2,5 h	0,446	3410
3	Lampada fluorescente stradale durante manutenzione	1150	0,58	6,3	> 2,5 h	0,505	3770
4	Faretto a led per illuminazione industriale	3281	2,46	169,3	5908	0,749	4528
5	Modulo led per illuminazione stadi	5574	3,20	67,7	> 2,5 h	0,574	3398
6	Plafoniera per illuminazione fluorescente da interni	328	0,14	1,9	> 2,5 h	0,430	3496
7	Faretto a led per illuminazione industriale	3019	2,76	337,5	2963	0,914	3433
8	Plafoniera per illuminazione fluorescente da interni	277	0,12	1,1	> 2,5 h	0,447	3641

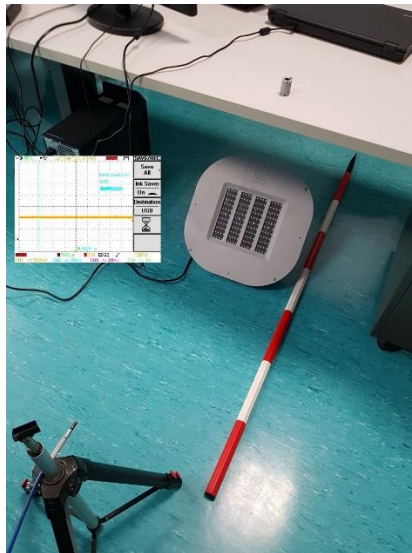
Misura	Sorgente	Illuminamento lux	Irradianza pesata E_b W/m^2	Radianza da luce blu $W/m^2 \cdot sr$	Tempo massimo di osservazione per rispettare il limite per luce blu s	Rapporto di luce blu $W/m^2 \cdot klux$	Temperatura di colore comparata $^{\circ}K$
9	Faro ad alogenuri metallici per illuminazione industriale	83	0,08	90,0	> 2,5 h	0,941	4195
10	Faro a led per illuminazione industriale	206	0,16	178,6	5600	0,756	4251
11	Faretto alogeno piattaforma idraulica	276	0,09	19,4	> 2,5 h	0,310	1650
12	Osservazione piano stradale da cabina di esazione	2275	2,04	8,1	> 2,5 h	0,895	3521
13	Osservazione corpi illuminanti fluorescenti in cabina di esazione	772	0,57	1,0	> 2,5 h	0,741	4792
14	Torcia led tascabile	11684	11,88	13614,7	73	1,017	5351

Figura 4: faro a led di cui alla misura 4 e misura della modulazione



Nella Figura 5 è mostrata la sorgente di cui alla misura 5. Questo dispositivo è progettato per essere affiancato da altri moduli in una torre-faro per illuminazione di stadi o altre aree di grande superficie. Anche il singolo modulo presenta un basso rapporto tra luce blu e illuminamento e rispetta il limite per L_B per tempi di osservazione indeterminati. La verifica con l'oscilloscopio non evidenzia alcuna modulazione apprezzabile.

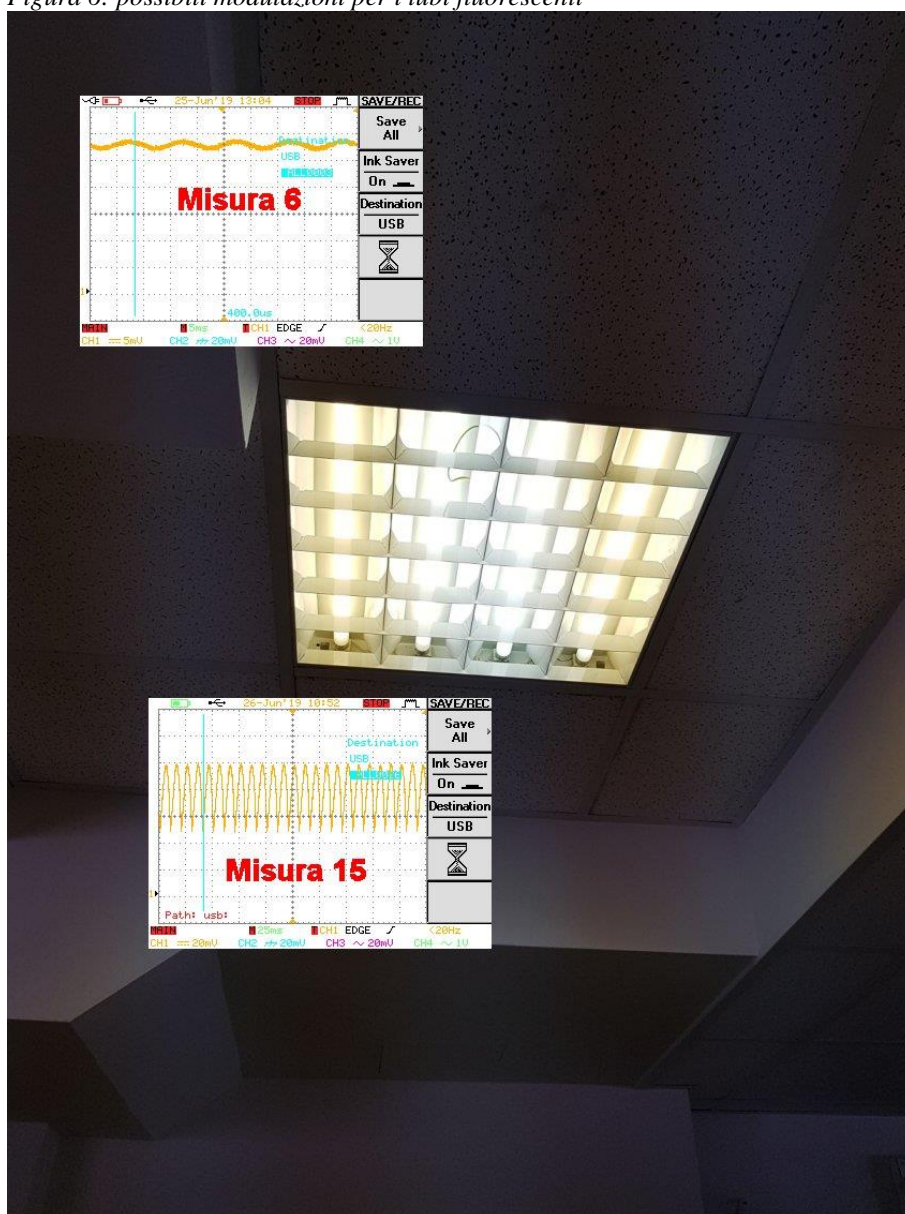
Figura 5: modulo per fari da stadio di cui alla misura 5



La Figura 6 riporta una tipica plafoniera da ufficio a tubi fluorescenti, con spettro molto simile a quello illustrato nella Figura 3.

La modulazione è sempre a 100 Hz (la base dei tempi delle due acquisizioni è diversa) ma misure eseguite in due ambienti con impianti apparentemente identici hanno mostrato risultati diversi in termini di modulazione.

Figura 6: possibili modulazioni per i tubi fluorescenti



Nella Figura 7 è illustrato il faretto a led di cui alla misura 7 che presenta ancora una notevole modulazione ma con forma d'onda diversa.

Figura 7: led di cui alla misura 7 con elevata modulazione



Le diverse modulazioni misurate sono riassunte in Tabella III; in tutti i casi la frequenza è doppia della frequenza di rete, ovvero il valore di 100 Hz che secondo IEEE richiede $M\% < 8$. Sono evidenziati in giallo i dispositivi che superano tale valore.

Tabella III: misure di modulazione

Misura		Modulazione M%	Frequenza Hz
4	Faretto a led per illuminazione industriale	18,5	100
5	Modulo led per illuminazione stadi	0,0	--
6	Plafoniera per illuminazione fluorescente da interni	3,6	100
7	Faretto a led per illuminazione industriale	28,0	100
15	Plafoniera per illuminazione fluorescente da interni	35,1	100

Discussione

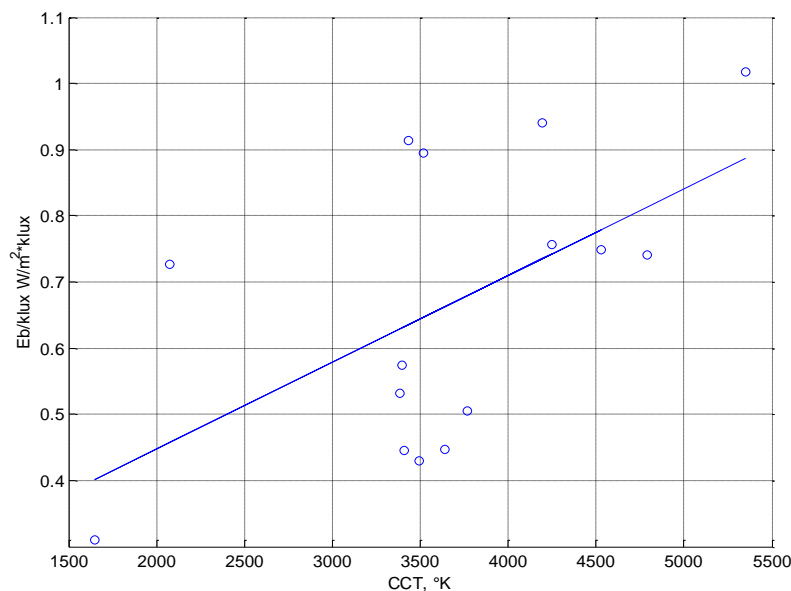
Il superamento del limite per L_B è stato effettivamente riscontrato per i dispositivi a led in quanto capaci di generare elevati flussi luminosi con piccole superfici della sorgente. Il caso della torcia a led (misura 14) ne è un esempio estremo.

L'intensità della luce blu in rapporto all'illuminamento non è risultata una prerogativa particolare dei led rispetto ad altre sorgenti così come lo sfarfallamento, che è dovuto all'elettronica dei diversi dispositivi.

Il confronto fra i valori misurati del rapporto di luce blu e le CCT, sia pure ricavate con un metodo approssimato, confermano che questo indice non è soddisfacente per caratterizzare sorgenti molto diverse dal corpo nero.

Nella Figura 8, è riportata la regressione lineare fra CCT e rapporto fra luce blu e illuminamento.

Figura 8: correlazione fra CCT e rapporto tra luce blu e illuminamento ricavata dalla Tabella I



Si conferma che valori estremi della CCT, < 3000 °K o > 4000 °K possono caratterizzare sorgenti sicuramente esenti dal rischio di luce blu e sorgenti che, se osservate sotto angoli piccoli, possono con buona probabilità comportare un rischio. Il grafico tuttavia evidenzia che a uno stesso valore di CCT possono corrispondere diverse percentuali effettive di luce blu.

Conclusioni

I dispositivi a led sono potenzialmente pericolosi per la caratteristica di produrre alti livelli di luminanza. CEI EN 62471:2009

Al fine di valutare il rischio fotobiologico di lampade e sistemi di lampade è stato emanato uno specifico standard CEI EN 62471:2009 che classifica tali sorgenti in 4 gruppi (4 classi di rischio) riportate in Tabella V). Questa norma prevede metodi di misura e classificazione e, anche se non definisce vincoli specifici per la marcatura, rappresenta attualmente lo stato dell'arte in termini di informazioni sulla sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampade (compresi i LED).

Nel corso del 2018 le norme IEC/EN/CEI di prodotto specifiche per ciascuna tipologia di sistema per illuminazione a LED (IEC CEI EN 62031; IEC 62612) sono state adeguate recependo i criteri di sicurezza fotobiologica e classificazione fissati dalla IEC CEI EN 62471:2009 (tabella 1). Pertanto - a seguito di tale adeguamento - per ciascuna tipologia di sorgente LED il costruttore garantirà specifici limiti di emissione; nel caso di sorgenti potenzialmente pericolose - cioè non appartenenti al gruppo "esente", come nel caso della torcia LED precedentemente discusso, - il costruttore sarà tenuto a fornire specifici segnali di pericolo, etichette ed avvertenze che ne garantiscano un utilizzo sicuro in relazione al rischio oculare, secondo quanto specificato IEC TR 62471-2, Photobiological safety of lamps and lamp system — Part 2: Guidance on manufacturing requirements relating to non-laser optical radiation safety.

Tabella V Classificazione rischio fotobiologico lampade secondo lo standard CEI EN 62471:2009

Gruppo	Stima del Rischio
Esente	Nessun rischio fotobiologico
Gruppo 1	Nessun rischio fotobiologico nelle normali condizioni di impiego
Gruppo 2	Non presenta rischio in condizioni di riflesso naturale di avversione alla luce o effetti termici
Gruppo 3	Pericoloso anche per esposizioni momentanee

Infine rischi legati alla percentuale di luce blu e alla modulazione dell'intensità devono essere considerati con maggiore attenzione e non sono prerogative delle sole sorgenti a led.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano la dott.ssa Chiara Burattini di Uniroma1 per i preziosi suggerimenti sul calcolo della CCT e la dott.ssa Iole Pinto Fisico Dirigente dell'USL Toscana Sud Est Laboratorio di Sanità Pubblica Agenti Fisici per la costruttiva revisione bibliografica di questo articolo.

Bibliografia

- [1] *Direttiva 2006/25/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 5 aprile 2006, sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (radiazioni ottiche artificiali) (diciannovesima direttiva particolare ai sensi dell'articolo 16, paragrafo 1, della direttiva 89/391/CEE)*
- [2] *OPINION of the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety on the "effects on human health and the environment (fauna and flora) of systems using light-emitting diodes (LEDs)"* ANSES Opinion Request No 2014-SA-0253 www.anses.fr
- [3] *Institute of Electrical and Electronic Engineers: IEEE 1789-2015 - IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers*
- [4] *Javier Hernandez-Andre's, Raymond L. Lee, Jr., and Javier Romero Calculating correlated color temperatures across the entire gamut of daylight and skylight chromaticities* Applied Optics 20 September 1999 y Vol. 38, No. 27
- [5] *C.S. McCamy Correlated Color temperature as an explicit function of chromaticity coordinates* Wiley Online Library; <https://doi.org/10.1002/col.5080170211>
- [6] *CEI EN 62471:2009 Sicurezza fotobiologica delle lampade e dei sistemi di lampada*
- [7] *IEC TR 62471-2, Photobiological safety of lamps and lamp system — Part 2: Guidance on manufacturing requirements relating to non-laser optical radiation safety.*
- [8] *IEC CEI EN 62031: 2018. Moduli LED per illuminazione generale - Specifiche di sicurezza*
- [9] *IEC 62612:2013+AMD1:2015+AMD2:2018 CSV Consolidated version Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages > 50 V - Performance requirements*