

2024

INTRODUZIONE - Nel 2022 il consumo globale di energia elettrica per illuminazione è stato di 1.735,64 TWh; di questi 1.268,68 TWh nei servizi e 466,96 TWh nel settore domestico [1]. L'illuminazione artificiale degli ambienti e delle postazioni

di lavoro, l'emissione di monitor dei PC, i display di strumentazioni, tablet e smartphone è sempre più realizzata con dispositivi a LED (Light Emission Diode). Il 50% delle vendite di dispositivi illuminanti ha riguardato la tecnologia a LED, la cui efficacia (Lumen per Watt) è cresciuta fino a superare recentemente quella delle lampade fluorescenti lineari [1]. Lo Scenario Net Zero Emissions del 2050 indurrà ad aumentare la quota dei dispositivi di illuminazione a LED, fino alla quasi totalità del mercato già nel 2030 [1], sollecitando i miglioramenti prestazionali.

Anche le tecnologie a cristalli liquidi (LCD) retroilluminati che avevano sostituito lo schermo a tubi catodici della TV o della strumentazione tecnica e poi quello dei PC vedono il loro posto occupato oggi dalle nuove tecnologie, dove il pixel dell'immagine è costituito da LED, fino ai punti quantici (nanoparticelle) nel caso della tecnologia QLED.

La diffusione in breve tempo dei sistemi LED ha sollecitato la valutazione del rischio fotobiologico associato alla maggiore emissione di luce blu, che partecipa alla regolazione del ciclo sonno/veglia, ma che può essere potenzialmente lesiva per la retina.

Per prevenire danni fotochimici alla retina, l'ICNIRP [2] ha proposto valori limite di esposizione. Le sorgenti sono classificate in 4 gruppi di rischio, dal gruppo esente da pericoli fotobiologici in condizioni prevedibili (di cui esempi sono l'illuminazione domestica e d'ufficio, i monitor di computer, gli schermi di apparecchiature, gli indicatori luminosi), al gruppo 3 di rischio elevato, anche in caso di esposizione breve o momentanea. Le sorgenti di luce artificiale, devono preventivamente essere valutate dai produttori in relazione al rischio per la retina e classificate in uno dei gruppi di rischio [3].

SPETTRO VISIBILE


La visione umana, capacità iniziata più di 500 milioni di anni fa [4], è l'esito dell'evoluzione di un apparato e di un organo sofisticato come l'occhio in un contesto luminoso dove la principale sorgente di illuminazione era *naturale* e rappresentata dal sole. Sorgenti secondarie erano le fiamme di una combustione. Solo recentemente la visione umana ha disposto di sorgenti luminose *artificiali* quali l'illuminazione elettrica ad incandescenza e a fluorescenza, con spettri di emissione che in questo

lavoro indichiamo come "tradizionali", e l'illuminazione a LED con spettri che definiamo come "nuovi".

La porzione dello spettro elettromagnetico che chiamiamo *visibile* comprende quelle onde elettromagnetiche che sono percepite dall'occhio e sono così in grado di far produrre al cervello la sensazione della luce, dei colori.

La parte di spettro elettromagnetico a cui l'occhio umano è sensibile viene detta "spettro visibile" e comprende le radiazioni di lunghezza d'onda compresa tra 380 e 780 nanometri (nm). Le sensazioni visive che le differenti lunghezze d'onda inducono sono le sensazioni cromatiche, che chiamiamo colori. Nell'intervallo di valori riferito riconosciamo le sensazioni cromatiche che si riportano nella tabella 1.

Tabella 1 Suddivisione dello spettro elettromagnetico visibile all'occhio umano

Nome colore	Sensazione cromatica	Lunghezza d'onda (nm)
Violetto		380 - 430
Blu		430 - 500
Ciano		500 - 520
Verde		520 - 565
Giallo		565 - 580
Arancione		580 - 625
Rosso		625 - 780

Queste sensazioni cromatiche sono definite come colori *spettrali*. Altre sensazioni cromatiche, altri colori, come il marrone, il rosa, i porpora sono definiti colori *non spettrali* e sono l'esito del funzionamento *tricromatico* del sistema visivo umano.

All'interno dello spettro della luce visibile, l'intervallo tra 380 e 500 nm è conosciuto come luce visibile ad alta energia (HEV), comunemente nota come "luce blu". In particolare, le lunghezze d'onda comprese tra 390 e 440 nm sono considerate particolarmente critiche per la capacità di produrre affaticamento oculare (visione offuscata, occhi irritati, secchezza oculare, mal di testa, abbagliamento, ecc.), disagio (disturbo del sonno e del ritmo circadiano) e potenziali effetti dannosi sulla retina (fotoretinite). [5].

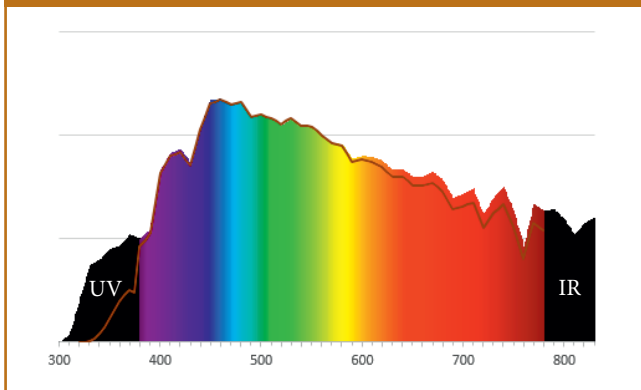
Per rappresentare gli spettri di emissione di sorgenti luminose è utile introdurre la *Temperatura di colore correlata* (T_{cp}), espressa in gradi Kelvin (K) e comunemente riportata nelle specifiche dei dispositivi illuminanti commerciali. Poiché un corpo emette radiazione elettromagnetica in funzione della sua temperatura, sia essa visibile o meno, secondo una legge teorica riferita ad una sorgente ideale *chiamata corpo nero*, la *temperatura di colore* è la temperatura in gradi Kelvin alla quale la luce emessa dal corpo nero determina una

sensazione visiva analoga a quella emessa dalla sorgente in esame. Maggiore il valore di T_{cp} maggiore è il contributo allo spettro delle lunghezze d'onda inferiori dello spettro, ovvero le parti blu e violetto.

SPETTRI NATURALI

L'illuminazione naturale proveniente dal Sole comprende lunghezze d'onda secondo distribuzioni che dipendono dalla stagione, dalla posizione geografica, dall'ora, dalle condizioni atmosferiche ecc. Rappresentazioni standard dell'illuminazione solare in differenti condizioni sono fornite dagli *Illuminanti* definiti dalla CIE (Commissione Internazionale per l'Illuminazione). L'illuminante denominato D65, rappresenta la luce media diurna con $T_{cp} \approx 6500$ K e la sua composizione spettrale nella banda visibile e nelle bande laterali a questa, infrarosso (IR) e ultravioletto (UV) è mostrata in figura 1 [6] insieme alla luce solare diurna interna, in ambienti indoor, rappresentata dall'illuminante ID65 ($T_{cp} \approx 6500$ K) [7].

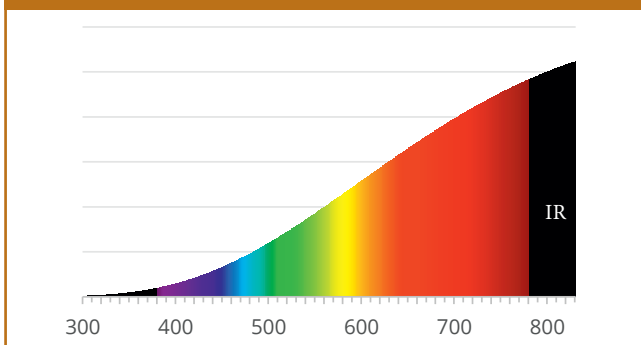
Figura 1 Spettri dell'illuminante D65, rappresentativo della luce diurna solare, e dell'illuminante ID65 (●) definiti dal CIE



SPETTRI ARTIFICIALI "TRADIZIONALI"

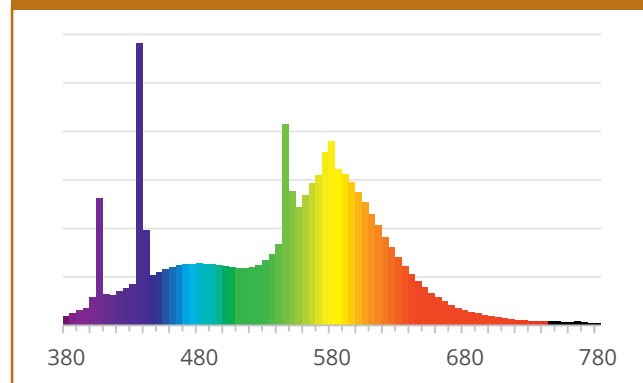
Le illuminazioni elettriche maggiormente diffuse sono state quelle prodotte da lampade a filamenti incandescenti e da lampade fluorescenti che sfruttano la emissione luminosa dei fosfori. Una rappresentazione dello spettro prodotto da una lampada ad incandescenza al tungsteno ($T_{cp} \approx 2856$ K) è fornita dall'illuminante A definito dal CIE ed è riportata in figura 2 [6]. Appare evidente l'intensa emissione di infrarossi confermata dalle alte temperature percepibili.

Figura 2 Spettro dell'illuminante A, rappresentativo della luce emessa da una lampada ad incandescenza, definito dal CIE.



La figura 3 mostra lo spettro CIE dell'illuminante FL2 rappresentativo di una lampada a fluorescenza standard ($T_{cp} \approx 4230$ K) [7]. Si osserva, in questo caso, il contributo delle componenti blu-violetto dello spettro visibile e maggiormente energetiche dovute all'emissione del gas che induce la fluorescenza dei fosfori.

Figura 3 Spettro dell'illuminante CIE FL2, rappresentativo di una lampada a fluorescenza standard ($T_{cp} \approx 4230$ K).

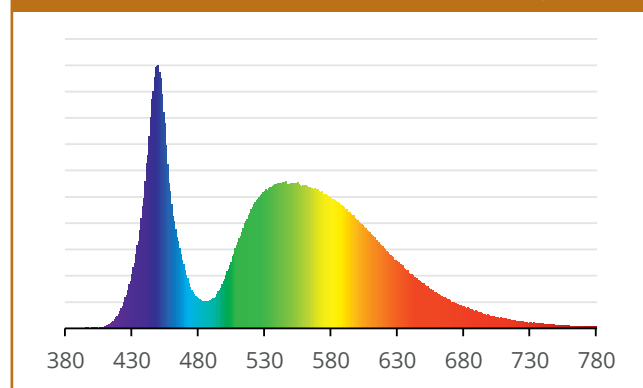


SPETTRI ARTIFICIALI "NUOVI"

Nei dispositivi a LED, lo spettro emissivo che il sistema visivo umano "vede" come luce bianca viene creato in due modi.

Nel primo viene ancora sfruttato il fenomeno della fluorescenza prodotta da fosfori che assorbono luce emessa da LED blu ed emettono luce a lunghezze d'onda superiori, nell'intervallo del verde e del rosso. Un esempio dello spettro emesso da una lampada bianca a LED è rappresentato nella figura 4. La luce emessa dal dispositivo illuminante contiene un intervallo stretto di lunghezze d'onda nella banda della radiazione di luce blu insieme ad un intervallo più ampio di lunghezze d'onda che vanno dal verde al rosso proveniente dai fosfori. Il sistema visivo umano ricombina lo spettro ricevuto creando la sensazione cromatica del bianco.

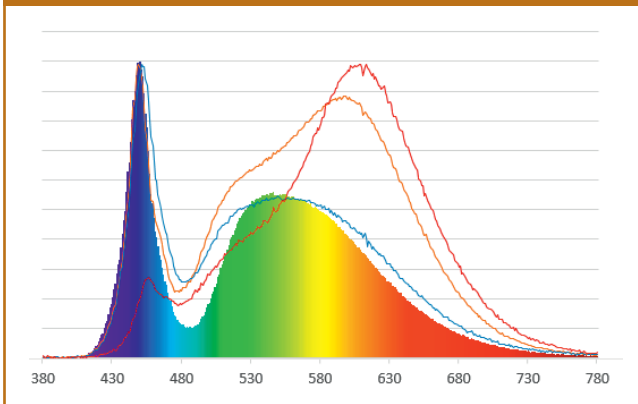
Figura 4 Spettro normalizzato emesso da una lampada bianca a LED con $T_{cp} = 6500$ K.



Rispetto agli spettri delle lampade ad incandescenza e fluorescenti, si osserva un maggiore contributo della radiazione nella parte blu dello spettro.

La figura 5 mette a confronto gli spettri emessi da lampade *bianche* a LED con differenti T_{cp} che danno luogo a differenti *sensazioni* di bianco.

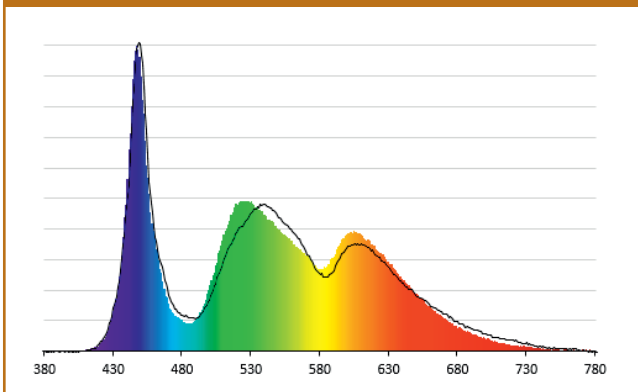
Figura 5 Spettri normalizzati emessi dalla lampada a LED di figura 6 e da lampade a LED con T_{cp} pari a 2700 K (●), 4000 K (■) e 6400 K (▲)



Il secondo modo consiste nell'utilizzare l'emissione di tre LED, rosso (*r*), verde (*g*) e blu (*b*).

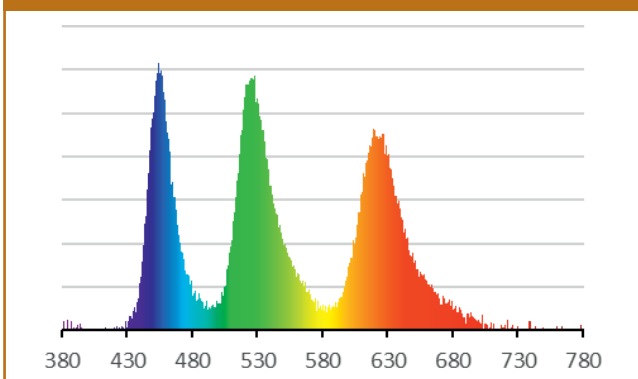
Nei display a LCD, per ogni pixel, la luce bianca della retroilluminazione a fluorescenza è fatta passare attraverso tre filtri *r*, *g* e *b* definiti subpixel. La figura 6 mostra gli spettri di emissione dei display LCD di un monitor e di un tablet impostati sul colore bianco (RGB: 255,255,255).

Figura 6 Spettri normalizzati emessi dai display LCD di un monitor e di un tablet (■) impostati sul colore bianco (RGB: 255,255,255)



Nei display a LED i subpixel sono costituiti da tre micro-LED *r*, *g*, *b*. La figura 7 rappresenta lo spettro emesso dal display a LED di un telefono cellulare impostato sul bianco.

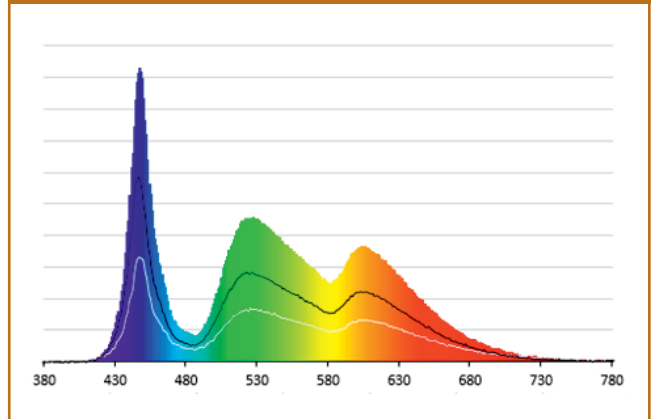
Figura 7 Spettro normalizzato emesso dal display a LED di un telefono cellulare impostato sul colore bianco (RGB: 255,255,255).



Per ottenere le altre sensazioni cromatiche le intensità delle tre sorgenti, i tre filtri o i tre micro-LED, vengono modulate.

La figura 8 riporta gli spettri emessi dallo stesso monitor LCD di figura 6 impostato anche su due intensità di grigio.

Figura 8 Spettri normalizzati di display LCD di un monitor impostati sul colore bianco, e sui grigi (RGB: 200,200,200) (■) e (RGB: 150,150,150) (■)



CONCLUSIONI

Le "nuove sorgenti luminose" contengono una proporzione di luce blu superiore a quella delle sorgenti tradizionali. Considerando che trascorriamo sempre più ore davanti a *devices* digitali, occorrerebbe definire le modalità di utilizzo di tali dispositivi e i meccanismi di protezione da attivare per non compromettere la salute oculare. L'esposizione notturna agli schermi elettronici e l'intensità dell'illuminazione a LED possono influenzare l'ampiezza della dilatazione della pupilla, importante in termini di potenziale danno alla retina. Andrebbe pertanto limitata l'esposizione a questi dispositivi in presenza di carenza di luce naturale o inadeguata luce artificiale. Ulteriori misure riguardano l'applicazione di protezioni per gli schermi dei dispositivi e l'uso di programmi e funzionalità integrate nei *devices* che limitino la trasmissione di HVE [5]. L'esposizione a luce blu può compromettere i meccanismi naturali di protezione dell'occhio dagli effetti dannosi della luce (restringimento della pupilla, chiusura delle palpebre, distoglimento dello sguardo, azione di filtraggio del cristallino). L'utilizzo di lenti per occhiali o di lenti a contatto che limitino la quantità di luce blu che raggiunge l'occhio è spesso fortemente raccomandato. Tuttavia, nella pratica clinica non esistono prove consistenti a sostegno dell'uso di tali filtri come trattamento efficace contro l'affaticamento della vista. Altrettanto viene indicato per una combinazione di filtri *blue-blocking* sia su occhiali che sui dispositivi [8].

Il crescente aumento dell'esposizione alla luce blu negli ambienti di vita e di lavoro porta inevitabilmente ad una sempre maggiore probabilità di riscontrare le patologie oculari sopra riportate. Sarebbe pertanto fondamentale progettare adeguati studi per la valutazione degli effetti a lungo termine dell'esposizione alla luce blu artificiale, soprattutto per specifici gruppi maggiormente sensibili quali bambini, anziani e individui con visione compromessa [9].

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] IEA (2022), Lighting, IEA, Paris <https://www.iea.org/energy-system/buildings/lighting>
- [2] ICNIRP Statement, *Light-emitting diodes (leds): implications for safety* published in: Health Phys 118(5):549-561; 2020
- [3] CEI EN 62471 (2010) Sicurezza Fotobiologica delle Lampade e dei Sistemi di Lampade
- [4] https://www.treccani.it/enciclopedia/paleontologia-dell-occhio_%28Frontiere-della-Vita%29/
- [5] Tossicità oculare da esposizione alla luce ed esigenze di protezione, documento di posizione, Parigi 19 novembre 2016
- [6] UNI EN ISO 11664 - 2:2023, Colorimetria - Parte 2: Illuminanti CIE di riferimento
- [7] R.W.G. Hunt and M.R. Pointer, *Measuring Colour*, John Wiley & Sons, Ltd., 2011
- [8] Eur. Phys. J. Plus (2023) 138: 1133, <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-023-04755-y>
- [9] Ophthalmol Ther (2023) 12:755-788 <https://doi.org/10.1007/s40123-023-00675-3>