

Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”



Laurea triennale in Ottica e Optometria

Effetti dell'esposizione alla luce blu e strategie per dosarla in modo ottimale

Relatore:

Prof.ssa Laura Bellia

Candidato:

Giuseppe Parillo

Matricola M44/616

A.A. 2019/2020

*Guardate le stelle invece dei vostri piedi.
Cercate di dare un senso a ciò che vedete,
e interrogatevi sull'esistenza dell'universo.
Siate curiosi.*

(Stephen Hawking)

*Non ho particolari talenti,
sono soltanto appassionatamente curioso.*

(Albert Einstein)

INDICE

Introduzione	5
 CAPITOLO I - La luce	
1.1 La natura della luce	6
1.2 Lo spettro elettromagnetico	7
1.2.1 Radiazioni UV e luce blu	7
1.3 Fattori che contribuiscono al rischio di esposizione alla luce blu	10
1.4 Normative concernenti i limiti di esposizione alla radiazione	11
 CAPITOLO II - Ruolo visivo e non visivo della luce	
2.1 Sistema visivo	14
2.1.1 Anatomia e fisiologia dell'occhio	15
2.1.1.1 La retina e i suoi recettori	16
2.1.2 Sensibilità spettrale del sistema visivo	18
2.2 Effetti biologici delle radiazioni sul sistema visivo	19
2.2.1 Danni da UV	20
2.2.2 Danni da luce blu	21
2.3 Sistema non visivo o circadiano	23
2.3.1 ipRGC e sensibilità spettrale	23
 CAPITOLO III – Luce blu e ritmi circadiani	
3.1 I ritmi circadiani	26
3.2 Cenni di fisiologia: secrezione della melatonina	27
3.3 Ruolo della luce e alterazioni del ritmo sonno-veglia dovute a luce blu	29
 CAPITOLO IV - Strategie di difesa	
4.1 Agire sul dispositivo e/o sul sistema di illuminazione	32
4.2 Agire sull'occhio	36
 CAPITOLO V – Analisi dei filtri in commercio con OSRAM Color Calculator	
5.1 Campioni analizzati	42

5.2 Metodo di analisi	42
5.3 Risultati	43
Conclusioni	47
Bibliografia	49
Sitografia	50
Ringraziamenti	51

Introduzione

Dai diodi ad emissione luminosa (LED) alla luce allo xeno, dalle lampadine a risparmio energetico alla radiazione elettromagnetica degli schermi: tutte le “nuove sorgenti luminose”, progettate per migliorare e facilitare la vita dell’uomo, contengono una proporzione di “luce blu” superiore a quella delle tradizionali lampadine del passato. La differente composizione spettrale della luce comporta un’esposizione ad una quantità di luce blu molto più elevata rispetto a prima. La luce blu-violetta visibile può potenzialmente danneggiare gli occhi e influenzare i ritmi circadiani dell’essere umano. Sebbene la luce blu-violetta abbia meno energia della luce ultravioletta, non viene quasi filtrata quando attraversa l’occhio raggiungendo, quindi, la retina. Al contrario, la luce ultravioletta è quasi interamente assorbita dalla parte anteriore dell’occhio e molto meno del 5% riesce a raggiungere la retina. Oggi tutti sono continuamente esposti a queste radiazioni provenienti sia dal mondo naturale (luce solare), che dal mondo artificiale (tablet, pc, smartphone, LED).

Lo scopo della tesi è quello di mettere in luce quanto la luce blu sia dannosa per la struttura oculare e come questa possa influire sui ritmi circadiani. Oltre agli effetti che la luce blu può avere sull’uomo, vengono illustrate alcuni possibili modalità di prevenzione nei confronti dei danni prodotti da queste radiazioni utilizzando appositi filtri oppure agendo sul sistema d’illuminazione ambientale tramite una corretta progettazione illuminotecnica che richiede l’intervento di più professionisti (dall’architetto all’ingegnere, dal designer all’ottico/optometrista, ecc.) in modo da coordinare strettamente tutte le competenze in gioco per poter garantire il benessere visivo dell’uomo.

Il presente lavoro si articola in 5 capitoli. Nel primo vengono introdotte tutte le caratteristiche della luce come onda e come particella e viene poi identificata, come fulcro dell’elaborato, la radiazione ad alta energia o, meglio, la radiazione di lunghezza d’onda nel blu, illustrando i possibili fattori di rischio e quali sono le normative internazionali in vigore riguardo i limiti di esposizione alla radiazione. Il secondo capitolo tratta il ruolo visivo e non-visivo della luce rispettivamente nel sistema visivo e in quello non visivo dell’uomo, ognuno con una propria sensibilità spettrale. Sono evidenziati poi gli effetti delle radiazioni sul sistema visivo e viene illustrato il funzionamento dell’elemento fondamentale per l’attivazione del sistema non visivo o circadiano: l’ipRGC. Nel terzo capitolo, vengono approfonditi i concetti relativi al sistema non visivo, in particolare il processo di secrezione di melatonina legato alla luce e le alterazioni del ritmo sonno-veglia dovute a luce blu evidenziando quali conseguenze l’illuminazione dei giorni attuali comportano per il corpo. Nel quarto capitolo si fa menzione di possibili strategie difensive nei confronti delle radiazioni di lunghezza d’onda nel blu. Infine, nel quinto, viene effettuato uno studio qualitativo sull’efficacia delle soluzioni messe in campo dalle aziende operanti nel campo dell’ottica.

CAPITOLO I: La luce

1.1 La natura della luce

Le prime teorie sulla natura della luce furono formulate nell'antica Grecia intorno al V secolo a.C. ad opera dei pitagorici e degli atomisti della scuola di Democrito. I primi sostenevano che la luce era dovuta a sottili bastoncelli che, uscendo dagli occhi, raggiungevano gli oggetti e li esploravano come organi di tatto. Gli atomisti, invece, ritenevano che dai corpi luminosi si staccassero i cosiddetti 'simulacri' o 'scorze' che, dopo essersi contratti, riuscivano a penetrare negli occhi e portare all'anima la forma e il colore dei corpi stessi.

Le due teorie, nonostante fossero differenti, avevano in comune il concetto che il meccanismo della visione implicasse il trasporto di materia dalla sorgente luminosa all'osservatore o viceversa. Questa convinzione rimase immutata per molti secoli ancora.

Molto più tardi, in particolare tra il XVI e il XVII secolo, i fenomeni luminosi vennero analizzati più rigorosamente grazie alle prime osservazioni sperimentali che consentirono la formulazione di alcune leggi dell'ottica. Le varie interpretazioni sulla natura della luce portarono, col passare degli anni, alla formulazione di due modelli ben distinti: il modello corpuscolare sostenuto dal fisico Isaac Newton e il modello ondulatorio avanzato inizialmente dal fisico olandese Christiaan Huygens e poi confermato, teoricamente, nel 1873 dallo scienziato scozzese James Clerk Maxwell e, sperimentalmente, nel 1888 grazie a Heinrich Hertz. Secondo la teoria corpuscolare, la luce è prodotta dall'emissione di piccolissime particelle materiali da parte delle sorgenti luminose; la teoria ondulatoria, invece, considera la luce come un insieme di onde dovute alla vibrazione di un mezzo circostante, una sorta di fluido impalpabile che permea tutto lo spazio e penetra anche corpi materiali a cui fu dato il nome di *etere*.

Per risolvere le contraddizioni tra le due teorie, Einstein, verso la fine del XIX secolo, postulò che l'energia di un'onda elettromagnetica è concentrata in quantità discrete o fotoni. Il fotone è un 'pacchetto di energia' che viaggia nel vuoto alla velocità della luce. La spiegazione di Einstein, tuttavia, non determinò l'abbandono della teoria ondulatoria in quanto il fotone trasporta un quanto di energia E il cui valore è legato alla frequenza ν dell'onda elettromagnetica dalla relazione $E = h\nu$, essendo h una costante di proporzionalità detta costante di Planck.

Visto l'affermarsi di entrambe le teorie nei vari fenomeni che interessano la luce, oggi si ammette che la luce ha un comportamento duale: nei fenomeni di propagazione mostra la sua natura ondulatoria, descritta dalla teoria delle onde elettromagnetiche, mentre nei fenomeni di interazione con la materia, mostra la sua natura corpuscolare descritta dalla teoria dei fotoni (Catalano 2002).

La luce è, dunque, un fenomeno di natura elettromagnetica ed è caratterizzata da un intervallo di frequenze ν compreso tra $7,5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ e $4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ alle quali l'occhio è sensibile. Poiché $\lambda = c/\nu$, con c velocità della luce nel vuoto, le lunghezze d'onda λ variano corrispondentemente alle frequenze sopra indicate, tra circa 400 e 700 nm (Merola 2004).

1.2 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro delle radiazioni elettromagnetiche (figura 1) ci indica gli intervalli di lunghezze d'onda e frequenze con diverse caratteristiche ed applicazioni. Di esse, solo una piccola parte, denominata spettro del visibile ($380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$), dà vita alla 'luce'.

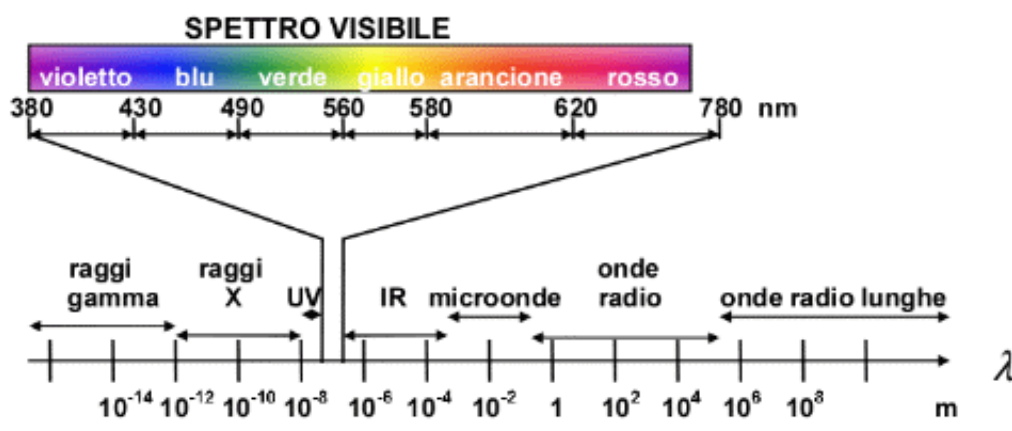


Figura 1. Lo spettro della radiazione elettromagnetica

Ogni radiazione monocromatica dello spettro trasporta energia, la quale è espressa dalla legge di Planck di cui al paragrafo precedente. Da tale relazione si deduce che minore è la lunghezza d'onda λ e maggiore sarà l'energia trasportata da un quanto. È questa una considerazione importante in vista di ciò di cui si tratterà nei prossimi capitoli, ossia quali sono i possibili effetti di questa energia e conseguentemente valutare le azioni atte a contrastarne, o almeno limitarne, i danni.

1.2.1 Radiazione UV e luce blu

La radiazione con una lunghezza d'onda inferiore a 400 nm è denominata luce ultravioletta.

Questa zona scende fino a una lunghezza d'onda di circa 10 nm. Al di sotto di questa zona, si trova quella dei raggi X (vedi figura soprastante) e si stende fino a lunghezza d'onda di circa 0,006 nm; la parte inferiore dei raggi X dello spettro si compone di onde denominate raggi gamma.

La radiazione ultravioletta può essere suddivisa, come per la luce visibile, in differenti bande.

Una prima suddivisione immediata è:

- UV vicino o prossimo (380-200 nm) e UV estremo (200-10 nm)

Qualora si consideri l'effetto dei raggi UV sull'essere umano, la gamma delle lunghezze d'onda UV è in genere suddivisa in:

- UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm), UV-C (280-100 nm).

Una delle possibili sorgenti delle radiazioni UV è rappresentata dal Sole; in generale, oggetti molto caldi, a causa dell'emissione di corpo nero, emettono radiazione UV. Il Sole emette radiazione ultravioletta a tutte le lunghezze d'onda, ma a causa della presenza dell'atmosfera, il 77% dei raggi UV del sole e le lunghezze d'onda minori non raggiungono la superficie terrestre. Sulla Terra, quindi, oltre il 95% della radiazione ultravioletta è rappresentato dagli UV-A con lunghezza d'onda maggiore e una piccola parte degli UV-B ¹.

Ma che cos'è la luce blu?

Come visto in precedenza, lo spettro della luce è molto articolato. Nel presente lavoro si analizzerà più nel dettaglio la luce che si trova nella lunghezza d'onda del "blu" (in realtà le radiazioni non hanno colore, ma l'utilizzo dell'aggettivo "blu" per piccole lunghezze d'onda è ampiamente diffuso) e della cosiddetta radiazione ad alta frequenza o HEV (figura 2). Il blu, nello spettro visibile, si trova a lunghezze d'onda che vanno da 380 nm fino a 520 nm; la luce blu, per la lunghezza d'onda e la frequenza posseduta, rientra nella cosiddetta radiazione ad alta energia HEV ².

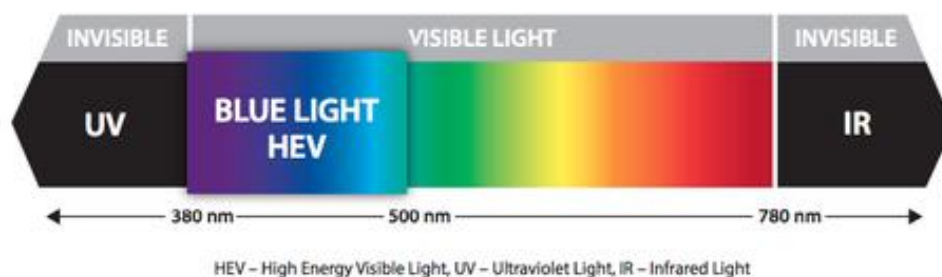


Figura 2. Radiazione HEV (High Energy Visible)

Una serie di ricerche dimostra alcuni aspetti fondamentali sulla luce blu, i quali evidenziano come della luce blu non si possa dare una definizione generalizzata, perché a seconda della lunghezza d'onda ha impatti differenti (figura 3). Si veda come la componente di luce blu compresa tra i 380 nm e i 455 nm (banda blu-violetta) sia, insieme agli UV, quella maggiormente dannosa per l'uomo. Se, invece, si osserva la componente di luce compresa tra i 465 nm e i 500 nm (banda blu-turchese o banda cronobiologica), si può evidenziare come questa abbia la funzione regolatrice dei ritmi circadiani quali il ritmo sonno-veglia. Tuttavia, come verrà illustrato nei prossimi capitoli, una impropria esposizione alla banda cronobiologica (465-500 nm) può essere comunque causa di alterazioni dei ritmi circadiani.

¹ www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation

² issuu.com/marcofabiano/docs/supplemento_b2eyes_protezione_ocula

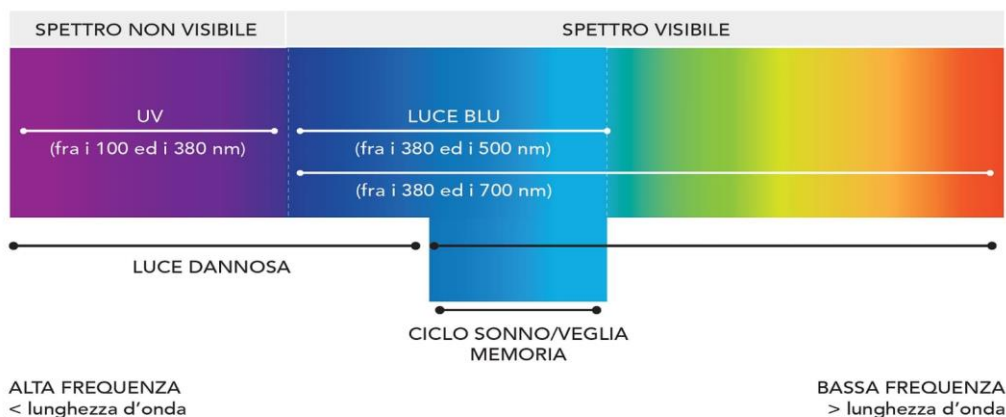


Figura 3. Suddivisione dello spettro elettromagnetico in bande.

UV-violetta (100-380 nm), Blu-violetta (380-450 nm), Blu-turchese (465-500 nm)

Questo tipo di luce è diventato, recentemente, oggetto di studio della comunità scientifica, in particolare degli ottici e optometristi. Per quale motivo? Nel 2009 viene pubblicato nella Gazzetta Ufficiale del regolamento (CE) N. 244/2009, dalla commissione dell'Unione Europea, un articolo per cui, nel 2012, si arriva ad un'abolizione totale della vendita delle lampadine ad incandescenza e ad alto consumo energetico.

Per poter supplire alla mancanza delle suddette fonti luminose, la tecnologia si è spesa nel creare nuove fonti luminose a basso consumo, favorendo così la nascita delle luci LED che sta per 'light-emitting diode' ossia diodo ad emissione luminosa.

L'analisi degli spettri di emissione di sorgenti luminose a LED (figura 4), di lampade a scarica ad alta intensità, così come dei dispositivi digitali quali tablet, smartphone, iPad e TV a LCD (figura 5), mettono in evidenza che tali dispositivi hanno un picco di emissione nella banda del blu a lunghezze d'onda molto simili tra loro (445-455 nm)³, quindi emissioni proprio nell'intervallo HEV, con la conseguenza di possibili effetti per l'essere umano che saranno descritti nei prossimi capitoli.

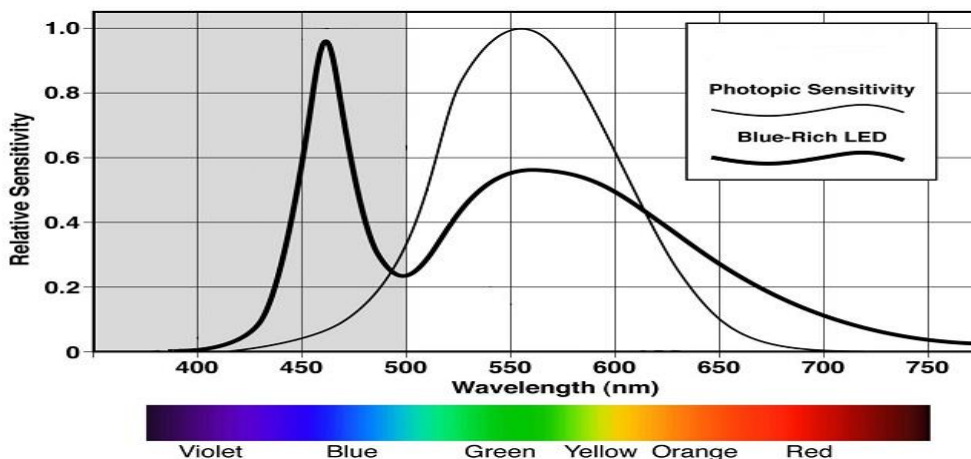


Figura 4. Emissione di sorgenti Led.

Si evidenzia il picco di emissione a circa 460nm, emissioni che non interessano la curva di sensibilità oculare.

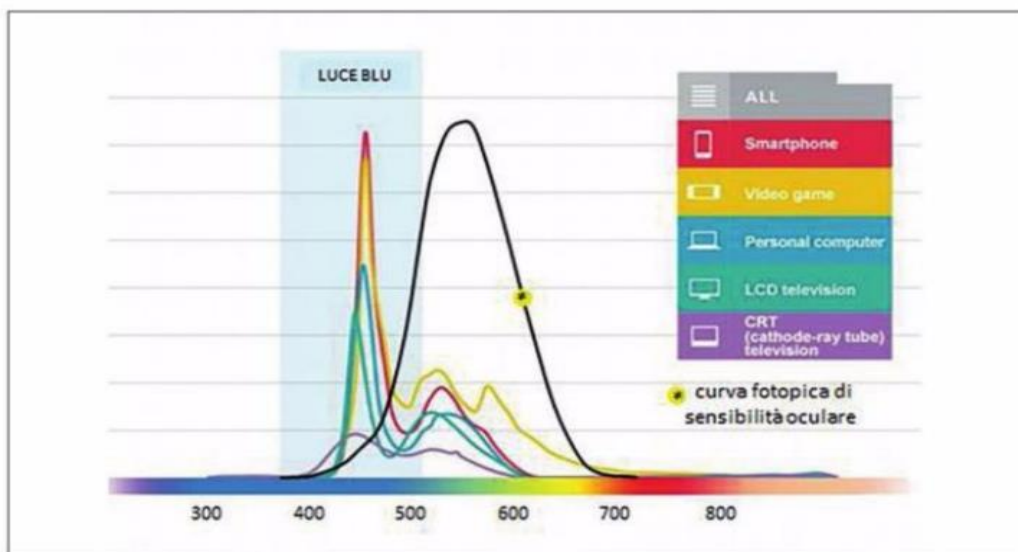


Figura 5. Emissione di comuni dispositivi digitali.
Si evidenziano i picchi che cadono fuori dalla curva di sensibilità oculare.

1.3 Fattori che contribuiscono al rischio di esposizione alla luce blu

Tra i fattori che, oggi, contribuiscono al rischio di esposizione a luce blu non bisogna dimenticare la luce solare, che è una delle prime sorgenti ad emettere questo tipo di radiazione. Le prime indicazioni sul fatto che la radiazione ottica possa comportare un rischio per l'essere umano si hanno fin dall'antichità, proprio in rapporto alle osservazioni solari (Piccoli et al. 2001).

Vedremo, più avanti, come la luce solare sia di fondamentale importanza in un processo fisiologico che è quello della regolazione dei ritmi circadiani nell'uomo.

Tralasciando le sorgenti di luce naturale, dalla fine dell'Ottocento per l'illuminazione artificiale sono state utilizzate lampade ad incandescenza che funzionavano tramite irradiazione di fotoni, surriscaldando un elemento metallico. Come accennato in precedenza, dopo che l'Unione Europea, dal 2009 ha messo al bando questa modalità di illuminazione, oggi sta prendendo piede, sia in interni sia in esterni, la tecnologia a LED, che ha una elevata radianza e minori costi di produzione, ma ha un picco molto importante di luce blu.

Stesso discorso è possibile fare per la maggior parte dei dispositivi digitali, che siano iPad, iPhone, tablet o schermi LCD; la loro modalità di retroilluminazione a LED può creare vari effetti, a livello oculare e non, soprattutto nei giovani che maggiormente stanno utilizzando e fanno un uso più prolungato dei dispositivi digitali. Una statistica del gennaio 2015 dell'agenzia 'We are social', evidenzia che 60,8 milioni di persone utilizzano le nuove tecnologie come Internet, Facebook,

Whatsapp, ecc, e le usano per diverse ore (durante la giornata ogni persona trascorre quattro o cinque ore davanti a queste strumentazioni) ⁴.

Senza considerare che ogni individuo usufruisce di più dispositivi tecnologici, infatti, come riportato da altre statistiche:

- Il 70,9% delle aziende ha almeno 10 individui che utilizzano dispositivi elettronici a lavoro per 8 ore;
- Circa 1 persona su 2 accede a Internet ogni giorno tramite dispositivi soprattutto nella fascia di età tra i 15 e i 24 anni;
- Il 74% di chi usa il cellulare, lo fa per più di 3 ore;
- In media un italiano rimane davanti alla televisione 4 ore e 40 minuti ⁵

Sono questi solo pochi dei dati che ci aiutano a comprendere la portata del fenomeno e l'effettivo tempo che un ragazzo passa davanti ad uno schermo a led. Tutto ciò spiega il forte interesse della comunità scientifica e in particolare degli esperti della visione.

1.4 Normative concernenti i limiti di esposizione alla radiazione

I limiti di esposizione rappresentano le condizioni in cui si ritiene che quasi tutti gli individui nella popolazione generale possano essere esposti ripetutamente senza effetti negativi sulla salute. La Commissione Internazionale per l'illuminazione (CIE) ha presentato lo standard internazionale IEC 62471. La norma IEC/EN 62471 specifica:

-tecniche di misura di riferimento (radianza e irradianza) prendendo in considerazione diversi campi di lunghezze d'onda;

-limiti di esposizione;

-classificazione della radiazione in gruppi di rischio: a seconda del grado di pericolosità della radiazione, gli apparecchi di illuminazione vengono classificati secondo quattro gruppi di rischio (esente/basso/medio/elevato).

I test ed i limiti di emissione non sono di immediata comprensione perché richiedono conoscenze tecniche specifiche e solo persone con le giuste competenze e laboratori attrezzati possono analizzare la pericolosità delle lampade. Di seguito, attraverso la conoscenza della norma, si cercherà di capire la pericolosità delle varie classi e se esistono lampade esenti da questo rischio. La EN 62471 definisce dei limiti assoluti di esposizione per la superficie della cute e della cornea (tab.1):

⁴ issuu.com/marcofabiano/docs/supplemento_b2eyes_luce_blu_bassa

⁵ ISTAT, "Cittadini, imprese e ICT", statistiche e report Anno 2017, www.istat.it/it/files//2017/12/ICT_Anno2017.pdf

Tipo di rischio	Lunghezza d'onda λ (nm)	Durata dell'esposizione t (s)	Limiti espositivi (W/m^2)
UV attinico cute e occhi	200-400	<30000 (8 ore circa)	30/t*
UV-A occhio	315-400	<1000 (16 minuti circa) >1000	10000/t 1
Luce blu piccole sorgenti*	300-700	<100 >100	100/t 1
IR occhio	730-3000	<1000 >1000	$18000/t^{0.75}$ 100

Tabella 1. Limiti assoluti di esposizione per la superficie della cute e della cornea.

*t = tempo di esposizione.

*piccole sorgenti = sorgenti luminose che sottendono un angolo inferiore a 0,011 radianti.

Inoltre stabilisce altri limiti per la retina (tab.2):

Tipo di rischio	Lunghezza d'onda λ (nm)	Durata dell'esposizione t (s)	Limiti espositivi (W/m^2)
Luce blu	300-700	<30000	30/t
Termico retinico	380-1400	<0.25 0.25-10	$50000/\alpha \cdot t^{0.25}$ $50000/\alpha \cdot t^{0.25}$
Termico retinico (stimolo visivo debole*)	780-1400	>10	$6000/\alpha^*$

Tabella 2. Limiti di esposizione per danno retinico

* α = angolo del campo visivo

*stimolo visivo debole = uno stimolo la cui luminanza massima (mediata su un campo visivo circolare che sottende 0,011 radianti) è inferiore a 10 cd/m^2 .

La EN 62471 definisce delle classi di rischio (tab.3):

Gruppo di rischio	Esente	1(Rischio basso)	2(Rischio medio)	3(Rischio elevato)
UV attinico	Assente entro le 8 ore di esposizione	Assente entro le 2:50 ore circa di esposizione	Assente entro i 16 minuti circa di esposizione	Qualsiasi rischio superiore al gruppo 2 appartiene al gruppo 3

UV-A	Assente entro i 16 minuti circa di esposizione	Assente entro i 5 minuti di esposizione	Assente entro 100 secondi di esposizione
Retinico da luce blu	Assente entro le 2:50 ore circa di esposizione	Assente entro i 100 secondi di esposizione	Assente entro i 0,25 secondi di esposizione
IR retinico	Assente entro i 10 secondi di esposizione	Assente entro i 10 secondi di esposizione	Assente entro i 0,25 secondi di esposizione
IR cornea	Assente entro i 16 minuti circa di esposizione	Assente entro i 100 secondi di esposizione	Assente entro i 10 secondi di esposizione

Tabella 3. Classificazione della radiazione in gruppi di rischio.

In base allo spettro di emissione caratteristico dei vari tipi di lampade solo alcune possono risultare pericolose ai fini di questa norma: le lampade che presentano rischi legati sia all'IR che al blu sono quelle alogene per applicazioni speciali; le lampade che non presentano rischi legati all'IR, ma soltanto al blu sono quelle a scarica tipo MH chiaro (ioduri) e quelle a LED.

Le lampade devono, sempre, riportare sulla confezione il gruppo di rischio e relativamente al rischio da luce blu, è possibile definire un valore di illuminamento (al livello degli occhi) in funzione della temperatura di colore (CCT) della lampada (tab.4), al di sotto del quale il rischio è uguale o inferiore al gruppo 1:

CCT (K)	Illuminamento (Lux)
<2350	4000
2350<CCT<2850	1850
2850<CCT<3250	1450
3250<CCT<3750	1100
3750<CCT<4500	850
4500<CCT<5750	650
5750<CCT<8000	500

Tabella 4. Valori di illuminamento legati alla CCT, con rischio uguale o inferiore al gruppo 1.

Al fine di escludere possibili situazioni di rischio soprattutto a medio e lungo termine è importante, in particolar modo nei luoghi di lavoro, attenersi ad alcune norme di sicurezza:

- escludere l'impiego di lampade nude (prive di protezioni) soprattutto per tempi protratti;
- informare gli utilizzatori del rischio da UV e delle corrette modalità di impiego delle sorgenti;
- provvedere ad una periodica manutenzione degli apparecchi illuminanti;

- evitare superfici altamente riflettenti attorno ai posti di lavoro
- effettuare mirati controlli medici per coloro che sono esposti a condizioni che per la durata e/o l'intensità di emissione sono ritenuti soggetti potenzialmente a rischio⁶.

CAPITOLO II: Ruolo visivo e non visivo della luce

2.1 Il sistema visivo

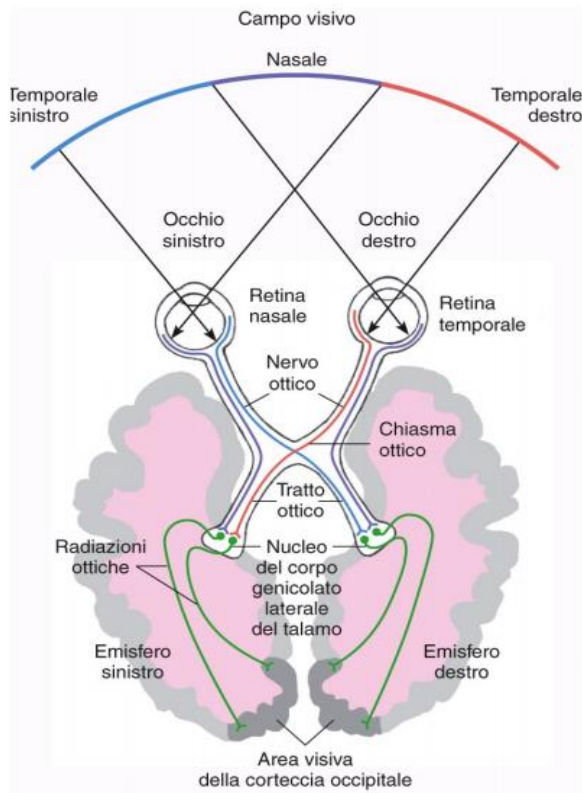


Figura 6. Vie visive: dall'occhio alla corteccia occipitale.

Il sistema visivo (figura 6) è l'insieme delle strutture che garantiscono la percezione visiva, attraverso una serie di processi che implicano non solo fattori fisiologici, ma anche una complessa rielaborazione dei segnali luminosi da parte del cervello. Esso si compone di:

- Occhio ed annessi;
- Nervo ottico;
- Tratto ottico;
- Pretetto, Ganglio ciliare, Nucleo oculomotore accessorio, vie ortosimpatiche e parasimpatiche;
- Collicolo superiore;
- Corpo genicolato laterale;
- Radiazioni ottiche;
- Corteccia visiva (primaria, secondaria e terziaria);
- Corteccia associativa;⁷

La prima tappa di questi processi ha sede negli occhi, responsabili della ricezione e traduzione dell'energia luminosa in segnali nervosi. Questi segnali sono poi elaborati nella corteccia cerebrale. Per capire in maniera completa il processo della visione occorre esaminare le funzioni dei vari organi trattati nei successivi paragrafi.

⁶ www.progettazioneottica.it/sicurezza-fotobiologica-delle-lampade-normativa-en-62471/620

⁷ [Wikipedia, Apparato visivo](https://it.wikipedia.org/wiki/Apparato_visivo)

2.1.1 Anatomia e fisiologia dell'occhio

L'occhio è un organo complesso che racchiude sia il sistema ottico vero e proprio, deputato alla formazione delle immagini sulla retina, sia una parte del sistema nervoso centrale che attua un'analisi iniziale di tali immagini. L'occhio propriamente detto è uno sferoide il cui diametro anteroposteriore medio è di 24mm, alloggiato nella cavità orbitaria, protetto dalle palpebre e da altri annessi oculari.

Il bulbo oculare è costituito da tre membrane sovrapposte (figura 7) e da un contenuto, il nucleo del bulbo oculare.

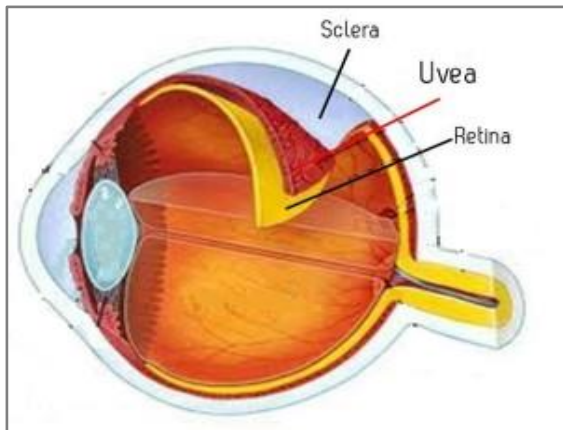


Figura 7. Tonache che rivestono il bulbo oculare.

La membrana più superficiale è la tonaca fibrosa, che in una piccola zona anteriore, a contorno circolare, è trasparente e prende il nome di cornea, la quale è in grado di assorbire le nocive radiazioni ultraviolette: in questo modo protegge le parti interne dal danneggiamento che queste radiazioni potrebbero produrre; nella restante parte è opaca e prende il nome di sclera. All'interno della tonaca fibrosa si trova la tonaca vascolare, ricca di vasi sanguigni e di pigmento

scuro e contenente elementi muscolari lisci. Questa, nella parte posteriore, prende il nome di coroide; anteriormente ha una struttura più complessa e forma, unendosi alla retina, il corpo ciliare e, più avanti, l'iride. L'iride è un diaframma con un forame centrale circolare, la pupilla, posta posteriormente e a una certa distanza dalla cornea; la sua funzione è quella di regolare la quantità di luce che entra nell'occhio.

La più profonda delle tre membrane è la tonaca nervosa, la retina, da cui origina il nervo ottico. La sua faccia posteriore prende il nome di parte ottica della retina, essendo responsabile della funzione visiva. La parte anteriore, invece, non contiene elementi di natura nervosa e prende il nome di parte cieca della retina (Rossetti & Gheller 2003).

All'interno del globo oculare, fra la cornea e l'iride, si trova uno spazio chiamato camera anteriore, riempito di liquido incolore, che prende il nome di umor acqueo.

Posteriormente alla camera anteriore, dietro iride e pupilla, si trova il cristallino o lente cristallina: un corpo trasparente e biconvesso connesso, grazie alla zonula ciliare, con la regione ciliare. Il cristallino ha una potenza che varia dalle 16 alle 20 diottrie grazie ai muscoli ciliari che ne modificano la curvatura consentendo di far cadere costantemente sulla retina il piano focale dell'immagine (accomodazione).

Tra l'iride, il corpo ciliare ed il cristallino è compreso uno spazio anulare, la camera posteriore, comunicante con la camera anteriore lungo il margine della pupilla, ripiena anch'essa dello stesso umor acqueo.

Il rimanente spazio del bulbo oculare, limitato dal cristallino anteriormente e dalla retina posteriormente, è occupato dal corpo vitreo, formato da sostanza di consistenza gelatinosa e trasparente.

La cornea, l'umor acqueo, il cristallino e il corpo vitreo costituiscono i mezzi diottrici dell'occhio, che può essere considerato come una lente convergente dotata di un potere refrattivo pari a circa 60 diottrie (Zeri et al. 2012).

2.1.1.1 La retina e i suoi recettori

La retina è la struttura sensoriale dell'occhio in cui avviene la fotorecezione e trasduzione della luce e si dà inizio a una prima elaborazione dell'informazione visiva. Essa è composta da una parte nervosa e da un epitelio pigmentato: la prima verso l'interno del bulbo, il secondo aderente alla corioide.

Da un punto di vista istologico, grazie alla monumentale ricerca di Santiago Ramon y Cajal (1906), la retina è comunemente schematizzata in dieci principali livelli. Detti livelli sono riassunti in tab.5.

NOMENCLATURA DEGLI STRATI RETINICI		
---	Coroide	Esterno
1	Strato epiteliale pigmentato	Cellule a base esagonale e propaggini ciliate verso l'interno
2	Strato dei fotorecettori	Segmento esterno (anteriore) dei fotorecettori
3	M. limitante esterna	Condensazione superficiale delle cellule gliali di Muller
4	Strato nucleare esterno	Segmento interno dei fotorecettori, nuclei di questi
5	Strato plessiforme esterno	Sinapsi tra fotorecettori, cellule bipolari e orizzontali
6	Strato nucleare interno	Corpi cellulari delle cellule bipolari e orizzontali (talvolta amacrine)
7	Strato plessiforme interno	Sinapsi tra cellule bipolari, gangliari e amacrine
8	Strato delle cellule gangliari	Corpi cellulari delle cellule gangliari
9	Strato delle fibre ottiche	Assoni delle cellule gangliari (formano il nervo ottico)
10	M. limitante interna	Racchiude strutture nervose e vasi (stesse cellule della m. limitante esterna)
---	Umor vitreo	Interno

Tabella 5. Nomenclatura degli strati retinici

Come si vede in figura 8, partendo dalla parte più esterna troviamo lo strato dei **fotorecettori (coni e bastoncelli)**, lo strato delle cellule orizzontali, bipolari, amacrine e gangliari, e il nervo ottico. Il compito dei fotorecettori è quello di trasformare in impulsi elettrici le informazioni ricevute dalle reazioni fotochimiche che vengono attivate dalla radiazione luminosa e di inviare questi

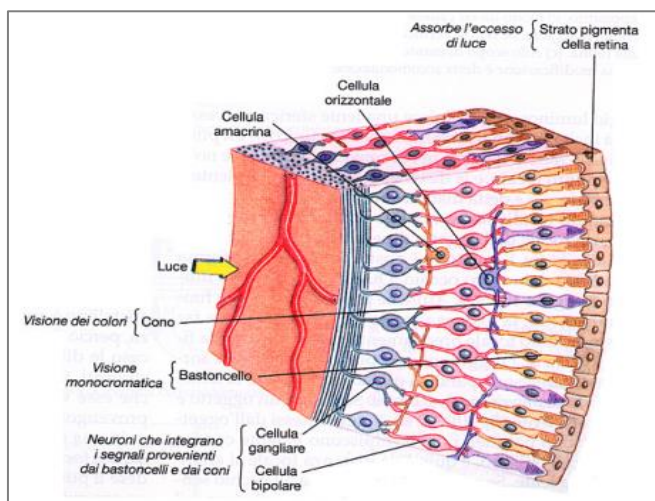


Figura 8. Strati della retina.

segnali ai neuroni retinici – le cellule orizzontali, bipolari, amacrine e ganglionari – che sono connessi fra di loro ed effettuano una prima elaborazione del segnale visivo.

Gli assoni delle cellule gangliari si riuniscono in modo da formare il nervo ottico, un cavo che conduce l'informazione visiva fuori dalla retina fino ai centri superiori, dapprima al corpo genicolato laterale e da qui alle aree corticali⁸.

I fotorecettori (coni e bastoncelli) sono entrambi costituiti da un segmento esterno, che contiene il pigmento fotosensibile, un segmento interno che racchiude l'apparato metabolico, quindi il nucleo della cellula fotorectrice e la terminazione (figura 9).

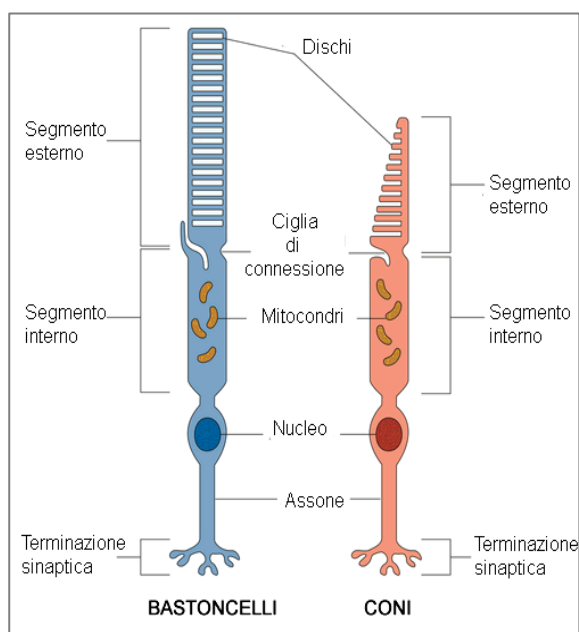


Figura 9. Rappresentazione di coni e bastoncelli.

I pigmenti fotosensibili (rodopsina nei bastoncelli e opsine nei coni), per effetto delle radiazioni ottiche, subiscono trasformazioni biochimiche, dalle quali ha origine l'impulso nervoso, che successivamente viene smistato ai centri della visione localizzati nel sistema nervoso centrale.

La distribuzione dei coni e dei bastoncelli varia sulla retina: la loro concentrazione (e di conseguenza l'acuità visiva) diventa molto maggiore in una zona che si presenta come una depressione rispetto alla circostante retina, di diametro circa 2mm, la macula lutea. Al centro della macula lutea si trova una zona, la fovea centralis, di diametro circa 0.25 mm.

I bastoncelli sono circa 100 milioni e pressoché assenti nella fovea, aumentano verso la periferia, raggiungendo la massima densità a 20° dalla fovea per poi ridiminuire. Essi sono più lunghi

⁸ [Il sistema visivo umano](#)

e stretti dei coni, posseggono più pigmento e possono quindi catturare più luce. La sostanza fotolabile espressa dai bastoncelli, la rodopsina, ha un picco di sensibilità a circa 500 nm, cosa che li rende privi di sensibilità cromatica; questo tipo di fotorecettori è ideale quindi per la visione notturna (scotopica).

I coni, invece, sono in numero molto ridotto, circa 5 milioni; la loro massima densità è nella fovea e decresce rapidamente verso la periferia. Essi sono caratterizzati da una bassa sensibilità alla luce, cosa che li rende attivi solo in visione diurna (fotopica). Esistono tre differenti tipi di coni sensibili alle corte, medie e lunghe lunghezze d'onda che vengono chiamati S, M e L (dall'inglese short, middle e long wavelength sensitive). I tre tipi di coni posseggono tre pigmenti visivi con un picco di sensibilità rispettivamente a circa 425, 530 e 560 nm. La sensazione di colore è legata ai rapporti delle attività neurali dovute ai tre fotopigmenti: ad esempio un raggio luminoso monocromatico della lunghezza d'onda di 450 nm produce una risposta forte dal fotopigmento blu, una risposta più debole dal verde ed una più debole ancora dal rosso. Inoltre i diversi tipi di coni non sono distribuiti uniformemente: il 60% circa dei coni contiene il pigmento rosso, mentre il 30% contiene il "verde" e solo il 10% contiene il pigmento blu. (Zeri et al. 2012).

2.1.2 Sensibilità spettrale del sistema visivo

Ogni essere umano ha una certa sensibilità alle diverse lunghezze d'onda, descrivibile approssimativamente dalle seguenti curve (figura 10), introdotte dalla CIE (Commission Internationale

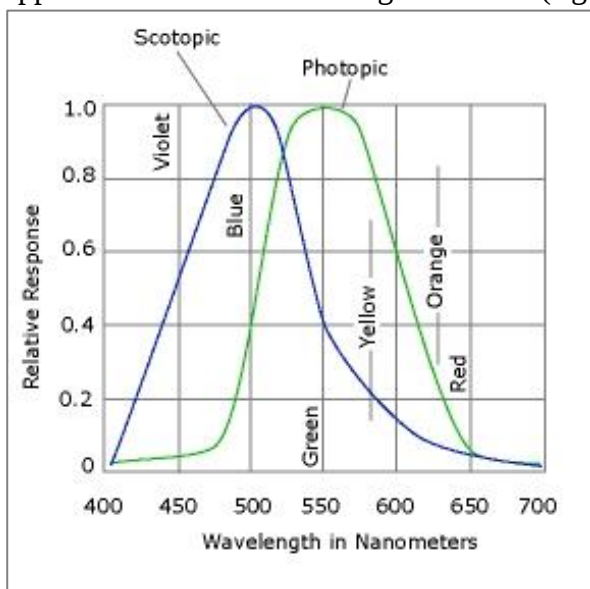


Figura 10. Curve di sensibilità spettrale dell'occhio umano in visione scotopica e fotopica.

de l'Eclairage) nel 1924 e nel 1955; esse rappresentano il fattore di visibilità relativo in funzione della lunghezza d'onda per visione fotopica e scotopica.

La curva per la visione scotopica (sensibilità in condizioni di penombra) è principalmente dovuta ai bastoncelli, quella fotopica (in condizioni di grande illuminamento) invece include i coni. Lo spostamento del massimo di sensibilità, da 555 nm a 507 nm, è dovuto all'utilizzo da parte dell'occhio, dei coni e poi dei bastoncelli. Questo effetto,

denominato Purkinije, rappresenta la tendenza

dell'occhio umano a percepire diversamente i colori in relazione alla quantità di luce presente nell'ambiente. La curva di sensibilità fotopica è stata adottata in fotometria come sensibilità

spettrale della retina umana, ovvero come funzione risposta media del sensore di luce di cui è dotato l'occhio⁹.

Nella tabella sottostante (tab.6) sono schematizzate le differenze tra la visione fotopica e quella scotopica. Durante la visione scotopica il massimo della curva, come precedentemente visto, si sposta verso lunghezze d'onda minori. In piena visione scotopica (cioè dopo circa 30 minuti di adattamento al buio) alcuni bastoncelli sono così sensibili che sono sufficienti pochissimi fotoni per stimolarne uno.

CARATTERISTICA	VISIONE FOTOPICA	VISIONE SCOTOPICA
Sostanza sensibile alla luce	Pigmenti dei coni (opsine)	Rodopsina
Tipo di cellule sensoriali	Coni	Bastoncelli
Tempo di adattamento	Rapido (meno di 8 min)	Lento (30 min)
Discriminazione colori	Sì	No
Acutezza visiva	Alta	Bassa
Numero di fotorecettori	7.000.000	120.000.000
Massima sensibilità spettrale	555 nm	507 nm

Tabella 6. Differenze tra visione fotopica e scotopica.

2.2 Effetti biologici delle radiazioni ottiche sul sistema visivo

La principale sorgente naturale di luce e radiazione ottica è il Sole, ma ne esistono e sono utilizzate molte altre che si è soliti definire sorgenti artificiali, vale a dire inventate e progettate dall'uomo per i più differenti scopi oltre a quello primario dell'illuminazione. Le diverse sorgenti artificiali possono essere distinte in due tipologie principali: quelle che emettono luce ad alta monocromaticità e coerenza, rappresentate dai laser, e quelle a 'larga banda' con emissione incoerente che include tutte le altre.

L'interesse principale di questo paragrafo è rivolto unicamente alle emissioni nella banda dell'UV e del primo visibile o luce blu, nonché ai loro effetti sulle diverse strutture oculari.

Riflessione, diffusione e rifrazione giocano un ruolo importante: la riflessione della radiazione da parte dei tessuti, ad esempio, può contribuire in modo sostanziale a ridurre l'assorbimento, mentre un mezzo diffusore, come l'atmosfera, posto tra sorgente e occhio, è in grado di attenuare anche notevolmente l'energia emessa in una determinata direzione.

È comunque evidente che il fenomeno fondamentale è quello legato ai processi di assorbimento di energia che portano a profonde modificazioni nella struttura oculare attraverso l'interazione con atomi e molecole.

⁹ [Efficienza luminosa](#)

Prima di capire quali sono le possibili lesioni fotoindotte, è opportuno fare una distinzione di quelli che sono i due principali meccanismi di danno:

- Lesione termica: lesione per la quale viene assorbita una sufficiente quantità di energia radiante tale da creare un sensibile innalzamento della temperatura del tessuto stesso (generalmente 10-25°C al di sopra della temperatura normale, per periodi dell'ordine del minuto). Le lesioni termiche sono direttamente proporzionali alla quantità totale di energia depositata e alla velocità con cui tale fenomeno è avvenuto. L'entità dell'eventuale lesione è direttamente proporzionale alle capacità del tessuto di dissipare calore, risultano quindi di fondamentale importanza l'idratazione e l'irrorazione dei tessuti (Piccoli 1998).
- Lesione fotochimica: essa è legata strettamente alla banda spettrale da cui proviene la radiazione. Una reazione fotochimica ha luogo infatti quando il singolo fotone ha energia sufficiente da mutare la singola molecola colpita in una o più molecole chimicamente differenti. La lesione fotochimica risulta essere caratteristica di esposizioni a lunghezze d'onda corte (più energetiche) come ultravioletti e luce blu. In particolare le lesioni sono legate alla modificazione dello stato di energia atomica delle molecole, con lesioni fotochimiche che rappresentano il risultato dell'eccitazione molecolare che rende le strutture colpite particolarmente reattive. A livello cellulare le radiazioni provocano denaturazione e coagulazione delle proteine cellulari, frammentazione del nucleo e perdita delle adesioni degli epitelii (Piccoli 1998).

2.2.1 Danni da UV

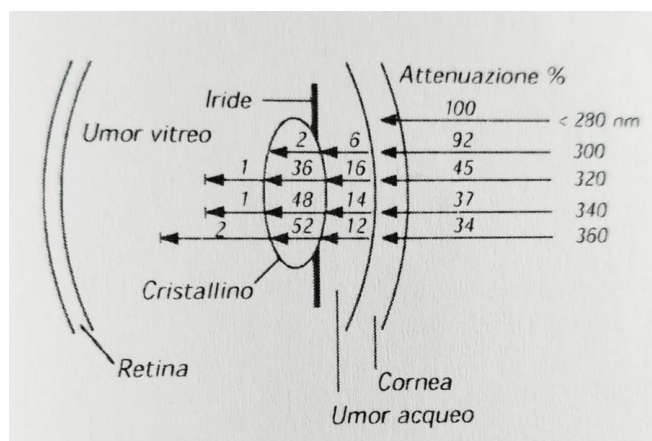


Figura 11. Schema dell'assorbimento percentuale dell'UV.

Nello schema seguente (figura 11) sono riportati i differenti coefficienti di assorbimento percentuale da parte delle diverse strutture oculari per la radiazione ultravioletta. Si può osservare che la radiazione UV ad alta energia (< 300 nm) viene totalmente assorbita dalla cornea mentre le lunghezze d'onda comprese tra 300 e 360 nm vengono equamente assorbite dalla cornea e dal cristallino; oltre quest'ultimo

la percentuale di radiazione non precedentemente assorbita (inferiore al 2%) viene completamente arrestata dall'umore vitreo e non giunge alla retina.

-Fotocheratocongiuntivite: La radiazione ultravioletta attinica è fortemente assorbita dalla cornea e dalla congiuntiva. Una eccessiva esposizione di questi tessuti può causare cheratocongiuntiviti (infiammazione dell'epitelio corneale e della congiuntiva) seguite o meno da complicanze. Il periodo di latenza varia inversamente rispetto all'intensità dell'esposizione e va da 30 minuti a 24 ore, anche se l'effetto si presenta entro le 6-12 ore. L'individuo ha la sensazione di avere un corpo estraneo (tipo sabbia) negli occhi e può presentare fotofobia, lacrimazione e spasmi delle palpebre. Il fastidio di solito scompare entro le 48 ore.

-Cataratta: Il termine cataratta indica una diminuzione di trasparenza del cristallino per lo più di natura degenerativa. Le opacità possono essere totali o parziali e assumere diversa morfologia e localizzazione (nucleare o corticale), determinando comunque una notevole riduzione del visus; la sintomatologia è varia e si va dalla riduzione dell'acuità visiva, alterazione del senso cromatico, possibilità di comparsa di diplopia monoculare fino all'abbagliamento delle ore diurne. Nell'uomo l'esposizione a radiazione UV naturale per lunghi periodi, può dare origine ad una riduzione della capacità di trasmissione del cristallino per le lunghezze d'onda corte del visibile oltre che alla comparsa di cataratta in età senile.

-Effetti sulla retina: La cornea ed il cristallino di solito schermano sufficientemente la retina dagli effetti dell'UV. Normalmente, meno dell'1% dell'UV-A raggiunge la retina, mentre le lunghezze d'onda più corte sono totalmente assorbite dagli strati più esterni.

2.2.2 Danni da luce blu

In questo paragrafo saranno esaminati quali sono i danni provocati dalla luce blu nella banda blu-violetta, ovvero radiazioni di lunghezze d'onda comprese tra 380 nm e 455 nm. La maggior parte

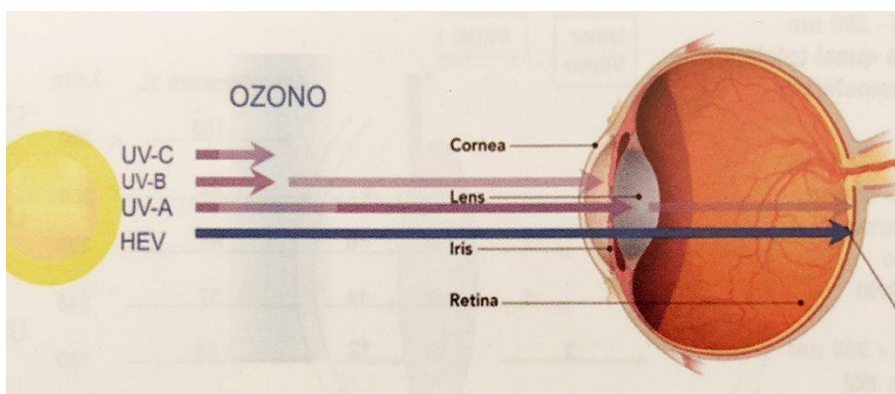


Figura 12. I danni della luce blu all'occhio: la luce UV influenza la parte anteriore dell'occhio, la luce blu incide maggiormente sulle patologie legate alla zona posteriore.

della radiazione blu (HEV), come si può osservare in figura 12, oltrepassa sia la cornea che il cristallino fino a raggiungere la retina che è, quindi, il principale bersaglio di questo tipo di emissione luminosa.

È importante sapere che le cause principali di cecità e ipovisione nel mondo sono rappresentate dalle patologie di superficie (film lacrimale, cornea), dalla cataratta (cristallino), e dalla degenerazione maculare (retina)¹⁰.

Tralasciando le alterazioni della luce blu sul sistema ‘non visivo’, che saranno spiegate nel capitolo successivo, di seguito verranno illustrati i principali effetti di questa radiazione esclusivamente sul sistema visivo, procedendo in direzione antero-posteriore.

-Occhio secco: è una malattia multifattoriale delle lacrime e della superficie oculare che porta sintomi di discomfort visivo e instabilità del film lacrimale. Il film lacrimale ha una funzione ottica, metabolica, lubrificante, di difesa e di pulizia. L’esposizione prolungata a schermi digitali determina una più rapida evaporazione del film lacrimale e il motivo risiede nello scarso ammiccamento: gli occhi vengono strizzati meno frequentemente e questo rallenta la diffusione del film sulla superficie dell’occhio, con sintomatologia soggettiva di bruciore, sensazione di corpo estraneo, secchezza, dolore oculare, nonché disturbi del visus.

-Cataratta: eludendo da quella che è la descrizione di questa patologia già vista sopra, è importante sottolineare che il ruolo fondamentale nell’insorgenza di questa è giocato dai processi ossidativi indotti dalla luce blu (foto-ossidazione). Per evitare la patologia bisogna cercare di eliminare la foto-ossidazione. Il nostro organismo possiede dei sistemi antiossidanti ma non sono sufficienti.

-Degenerazione maculare senile (DMS): è una patologia che, solitamente, si sviluppa intorno ai 70-80 anni ma oggi si riscontra anche in soggetti più giovani, intorno ai 50 anni. Fondamentale, quindi, è la prevenzione. La radiazione induce un’alterazione dell’epitelio pigmentato e dei fotorecettori con accumulo di materiale difficilmente digeribile dalla retina, comportando alterazioni strutturali e la formazione delle cosiddette ‘drusen’, ossia formazioni degenerative di colore giallastro. L’epitelio pigmentato è lo ‘spazzino’ della retina, se viene colpito dalla luce blu altera la sua fisiologia. Aumenterà, quindi, il materiale di scarto accumulato determinando l’inizio della degenerazione maculare. Le drusen sono individuabili immediatamente come degli spot giallastri tramite un esame oftalmoscopico; pertanto, durante un controllo optometrico, è importante fare un’attenta analisi per poter consentire al medico specialista di fare un’eventuale diagnosi precoce di DMS. In questi casi va subito consigliato l’utilizzo di una protezione attraverso occhiali con filtri appropriati, oltre che una sana alimentazione. La sintomatologia soggettiva del paziente è la distorsione delle immagini, o metamorfopsie, mentre nelle fasi terminali atrofiche uno scotoma centrale.

¹⁰ www.b2eyes.com/b2eyes-magazine/supplemento-62017-luce-blu-e-patologie-oculari

Esistono due tipi di degenerazione maculare: una secca o atrofica in cui c'è assottigliamento della retina centrale, poco nutrita dai capillari con conseguente atrofizzazione e formazione di una cicatrice sulla macula; l'altra, di forma umida o essudativa, caratterizzata da neovascolarizzazione e distacco dell'epitelio pigmentato a causa dell'accumulo di liquido tra l'epitelio e lo strato collagene interno della membrana di Bruch (Buratto 2010).

-Affaticamento visivo: quello che provoca la luce blu, a causa della sua bassa lunghezza d'onda, è creare una situazione di forte diffusione con diminuzione del contrasto. Inoltre, l'abbagliamento e la mancanza di focalizzazione obbligano il soggetto ad una costante messa a fuoco, con conseguente affaticamento visivo.

2.3 Sistema non visivo o circadiano

Numerose ricerche hanno dimostrato che la luce non solo consente la visione dell'ambiente che ci circonda ed è fondamentale nel determinare le performance del nostro sistema visivo, ma genera una serie di effetti sul nostro organismo, definiti risposte non visive o 'non imaging forming effects' (Lucas et al. 2013).

La luce, infatti, risulta essere uno dei principali regolatori del sistema circadiano, una sorta di orologio biologico che, sulla base di cicli che si ripetono circa ogni 24 ore, è in grado di gestire una serie di processi fisiologici come l'alternanza delle fasi di sonno e di veglia o la produzione di alcuni ormoni. Questi effetti biologici della luce sono influenzati dalla presenza di un ulteriore tipo di fotorecettore dell'occhio recentemente scoperto: le ipRGC (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells), cellule ganglionari retiniche intrinsecamente fotosensibili. Queste cellule hanno una certa capacità fotorecettiva grazie alla presenza di un fotopigmento dell'opsina, la melanopsina.

La scoperta delle ipRGC pone, quindi, le basi per poter ipotizzare una differenza tra la sensibilità spettrale del sistema visivo (coni e bastoncelli) e quella del sistema non visivo (ipRGC), ossia di quelle risposte alla luce che non contribuiscono alla formazione di immagini.

2.3.1 ipRGC e sensibilità spettrale

La scoperta delle cellule gangliari retiniche intrinsecamente fotosensibili (ipRGC), negli ultimi anni, ha portato gli studiosi a comprendere quali sono le caratteristiche di queste e come rispondono agli stimoli luminosi. Innanzitutto si è visto che le ipRGC costituiscono solo una piccola parte delle cellule gangliari totali (1-5% a seconda della specie e metodo di stima) e che possono rilevare la luce anche se isolate dal resto della retina; questo spiega il motivo per cui una certa fotosensibilità sopravvive con la perdita della funzionalità dei coni e dei bastoncelli.

Le differenze principali tra ipRGC e coni e bastoncelli sono due:

1. I coni e i bastoncelli esprimono, rispettivamente, opsine e rodopsina come elemento di fotorecezione; le ipRGC utilizzano una proteina, compresa nella famiglia delle opsine, chiamata melanopsina.
2. I coni e i bastoncelli iperpolarizzano se illuminati, mentre le ipRGC depolarizzano in risposta alla luce e, se lo stimolo è abbastanza elevato, generano potenziali d'azione.

La melanopsina, il fotopigmento delle ipRGC, in seguito agli stimoli luminosi, trasmette le risposte al NucleoSopraChiasmatico (NSC) tramite il tratto retinoipotalamico. Sebbene la fotorecezione della melanopsina sia molto meno sensibile di quella dei bastoncelli o dei coni, si è visto come le risposte delle ipRGC possono comunque essere sensibili a livelli di illuminazione molto più bassi (Lucas et al. 2012). Quanto appena detto evidenzia una caratteristica importante, ovvero che le ipRGC ricevono input dalla retina esterna (figura 13a). Quindi il modello di attivazione delle ipRGC è un segnale complesso che deriva da:

- risposta intrinseca alla luce (fotorecezione della melanopsina);
- segnali provenienti da coni e bastoncelli.

Ciò amplia l'intervallo di stimoli che possono suscitare risposte circadiane e spiega perché anche gli animali che sono privi di melanopsina, mostrano risposte alla luce che non contribuiscono alla formazione di immagini (Ruby et al. 2002).

A livello originario, quindi, il segnale che guida le risposte non visive alla luce è determinato dall'influenza di più processi recettivi. È possibile, infatti, definire le risposte non visive direttamente a partire dagli stimoli dei 5 fotorecettori caratteristici del sistema visivo umano. Il sistema visivo umano, infatti, è basato su 5 tipi di fotorecettori: i tre tipi di coni S, L, M, i bastoncelli e le cellule gangliari, queste ultime responsabili della regolazione dei ritmi circadiani. Ciascuno di questi

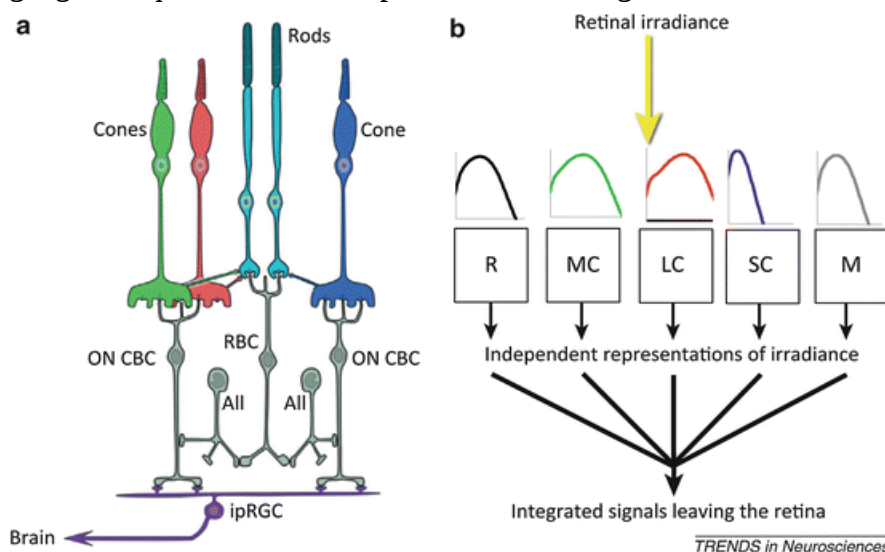


Figura 13. Tutte le classi di fotorecettori retinici sono a monte delle risposte circadiane alla luce.

13a. Schema dei circuiti retinici rilevanti degli esseri umani.

13b. Le funzioni di sensibilità spettrale alla luce dei 5 fotorecettori.

meccanismi di rilevamento della luce ha una differente curva di sensibilità alla luce come riportato in figura 13b. I dati che emergono dalle ricerche scientifiche indicano che la sensibilità spettrale delle ipRGC ha un picco di lunghezza d'onda intorno ai 480 nm. Come precedentemente detto, la modalità di accensione delle

ipRGC può quindi essere influenzata da cinque fotorecettori spettralmente distinti. Ne consegue che la sensibilità spettrale delle risposte a valle, è determinata dal modo in cui questi cinque canali sono combinati.

Un esempio ci è dato da alcuni studi effettuati sul riflesso pupillare alla luce:

- a bassi livelli di luce, al di sotto della soglia della melanopsina, la pupilla si accorda con le sensibilità spettrali dei coni o bastoncelli;
- per irradiazioni elevate, le prime componenti della costrizione pupillare sono definite dalla sensibilità spettrale dei coni, le componenti successive dalla melanopsina;
- per irradiazioni intermedie, le componenti della costrizione pupillare sono definite da una combinazione delle due (Lucas et al. 2013).

In conclusione si può affermare che, seppur i due sistemi (visivo e circadiano) siano entrambi sensibili agli stimoli luminosi, essi hanno due curve di sensibilità spettrale distinte (figura 14); in particolare le luci fredde (ossia ricche di piccole lunghezze d'onda) sono maggiormente efficienti nel generare una risposta circadiana rispetto alle luci calde a parità di stimolo visivo.

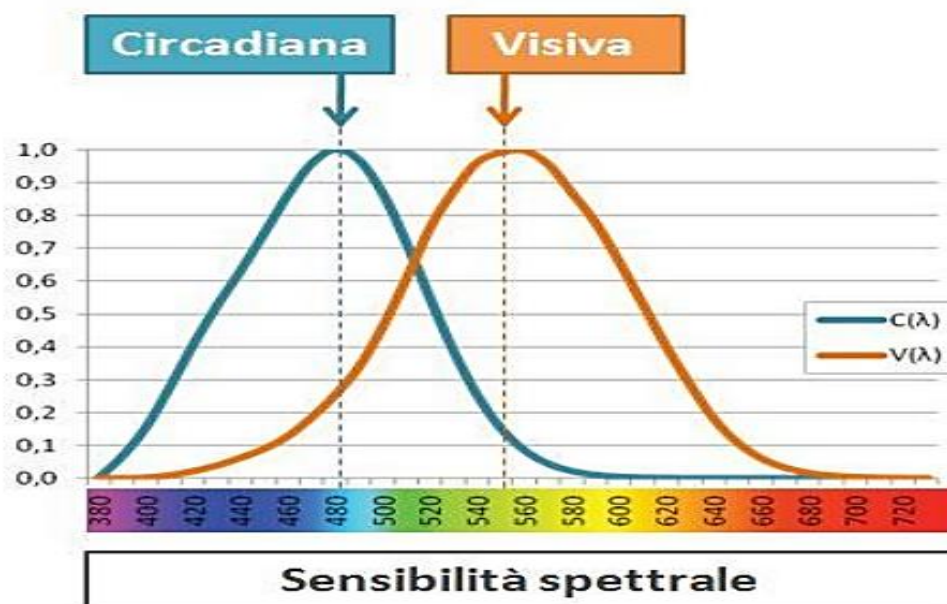


Figura 14. Sensibilità spettrale dei due sistemi.

-Sistema circadiano: picco a $\lambda = 480 \text{ nm}$

-Sistema visivo: picco a $\lambda = 555 \text{ nm}$

CAPITOLO III: Luce blu e ritmi circadiani

3.1 I ritmi circadiani

L'enciclopedia 'Treccani' definisce ritmo circadiano come un "ciclo che si compie all'incirca ogni 24 ore, con cui si ripetono regolarmente certi processi fisiologici". Esempi di ritmo circadiano possono essere il ritmo sonno-veglia, il ritmo di secrezione del cortisolo, il ritmo di variazione della temperatura corporea (figura 15).

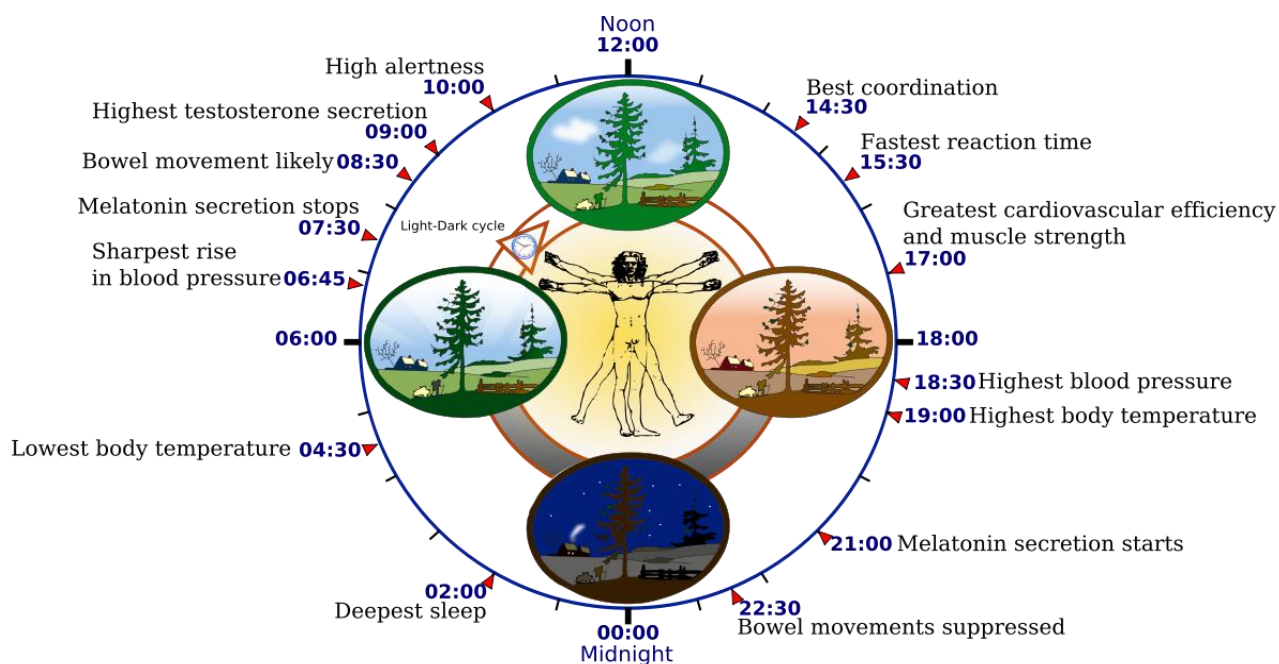


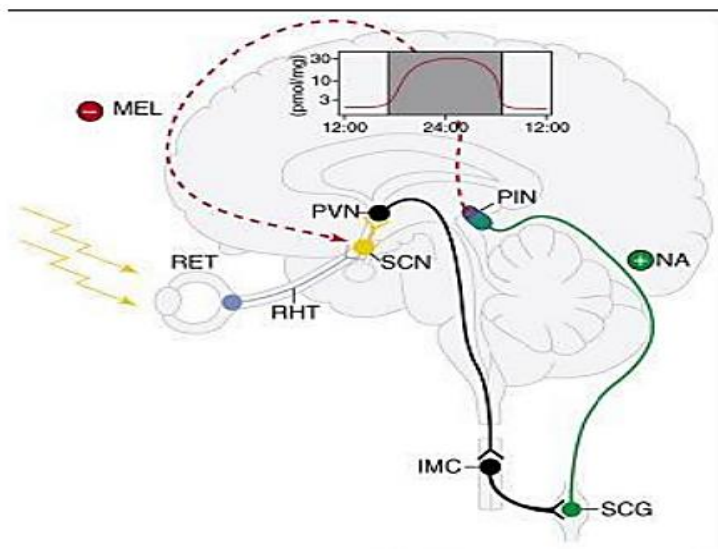
Figura 15. Alcune caratteristiche dell'orologio biologico circadiano umano.

Gli orologi biologici circadiani oscillano con un periodo che si approssima alla durata di un giorno astronomico e regolano una grande varietà di fenotipi ritmici che caratterizzano il metabolismo, la fisiologia e il comportamento della maggior parte degli organismi che popolano la Terra.

Sin dal suo inizio, infatti, la vita sulla Terra è stata sempre regolata dalla successione ritmica del giorno e della notte, dipendente dalla radiazione luminosa del Sole. Pertanto non stupisce il fatto che gli organismi viventi abbiano sviluppato sistemi sofisticati in grado di percepire le variazioni dell'ambiente esterno e quindi la presenza o meno della luce e adattarsi di conseguenza a questi cambiamenti per poter sopravvivere. Come ricordano, infatti, le teorie darwiniane sulla selezione naturale, l'organismo in grado di adattarsi meglio ha maggiori probabilità di resistere con successo alle mutazioni ambientali.

Nel corso degli anni, sia nell'animale che nell'uomo, si sono sviluppati meccanismi in grado di registrare le modificazioni ritmiche dell'ambiente, soprattutto in termini di alternanza luce/buio, farle

Il nucleo soprachiasmatico (NSC), il quale viene considerato il componente principale del cosiddetto ‘orologio biologico’ dell’organismo e che garantisce una ritmicità circadiana intrinseca (nell’uomo è di circa 24.2 ore), non è sufficiente per il corretto funzionamento dell’organismo; è importante che tale ciclicità sia in sintonia con i ritmi dell’ambiente circostante. Per questo motivo la luce è di fondamentale importanza: essa trasmette le informazioni attraverso la retina, in particolare tramite le ipRGC e la melanopsina che attivandosi dà avvio ad una differenza di potenziale in grado



di trasferire parametri di luminanza lungo un tratto, chiamato tratto retino-ipotalamico, che le collega al NSC. Il NSC a sua volta trasmette, tramite i realising factors, segnali alla ghiandola pineale (epìfisi) situata nella parete posteriore del terzo ventricolo e la stimola a produrre melatonina, ormone molto importante nella regolazione del sonno.

RET= retina; RHT= tratto retino-ipotalamico; SCN= nucleo soprachiasmatico; PVN= nucleo paraventricolare; IMC= colonna mediolaterale del midollo spinale; SCG= ganglio cervicale superiore; NA= noradrenalina; PIN= ghiandola pineale; MEL= melatonina

Nei prossimi paragrafi sarà analizzato il ruolo della luce, in particolare quella blu, nella regolazione del ritmo sonno-veglia.

L'epifisi, o ghiandola pineale, è l'unico organo endocrino in contatto con l'ambiente esterno tramite una complessa via nervosa già ricordata sopra (e per questo appunto denominato anche trasduttore fotoneuroendocrino). Essa svolge un'attività apparentemente semplice, cioè quella di produrre sostanze fra le quali la più importante è la melatonina, in risposta a stimoli provenienti dal nucleo

27

soprachiasmatico (NSC); apparentemente semplice perché essa è la principale responsabile dell'espressione ritmica di numerosi geni e di segnali intracellulari coinvolti in tale meccanismo. La produzione di melatonina nel circolo periferico avviene seguendo un ben noto ritmo circadiano che prevede valori plasmatici massimi (dell'ordine di circa 50-200 pg/ml) durante le ore notturne e minimi durante quelle diurne (circa 2-10 pg/ml) (figura 17).

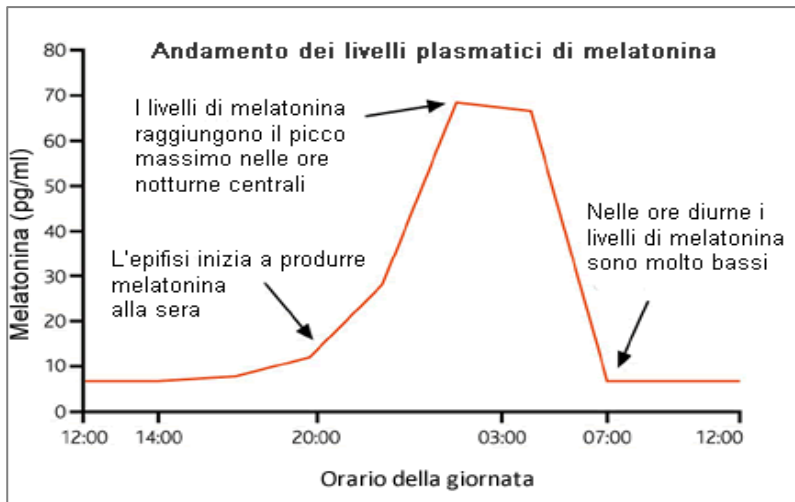


Figura 17. Andamento dei livelli plasmatici di melatonina durante le 24h.

Le fibre post gangliari del sistema simpatico provenienti dal ganglio cervicale superiore (che è collegato con la retina) terminano a livello della membrana del pinealocita e regolano la sintesi di melatonina mediante la liberazione di noradrenalina dal bottone sinaptico. La liberazione di noradrenalina avviene durante le ore

notturne. Successivamente al legame della noradrenalina con il recettore adrenergico sulla membrana del pinealocita si ha l'attivazione dell'enzima adenilato-ciclastasi e conseguente produzione di AMP-ciclico. Tale aumento promuove la sintesi di proteine, fra le quali anche gli enzimi necessari per la sintesi di melatonina e in particolare l'enzima limitante N-acetiltransferasi (AA-NAT). Durante la fase di luce, l'attività elettrica del nucleo soprachiasmatico (NSC) è elevata e in tali condizioni la liberazione di noradrenalina risulta bassa. Al contrario, durante la fase di buio l'attività del NSC viene inibita, mentre la sintesi della melatonina è stimolata dall'aumento della noradrenalina. All'interno del pinealocita, in seguito a stimolazione dei recettori adrenergici sulla membrana cellulare, a partire dal triptofano, si ha la formazione di composti intermedi, fra i quali anche la serotonina, in presenza di una serie di enzimi, di cui il principale è l'AA-NAT che converte la serotonina in N-acetilserotonina, la cui attivazione ciclica è direttamente dipendente dall'attività del nucleo soprachiasmatico, dalla informazione luminosa, oltre che dalla ritmica trascrizione dei geni codificanti. Ne consegue che anche i soggetti non vedenti, pur non percependo lo stimolo luminoso attraverso la retina, e quindi mancando del segnale più efficace in grado di inibire la secrezione di melatonina, dimostrano ugualmente un ritmo circadiano (e non una secrezione di melatonina sempre elevata), anche se spesso tale ritmo non è del tutto sincronizzato con l'ambiente esterno. Una volta formata, la melatonina non viene immagazzinata all'interno della ghiandola pineale, ma diffonde nei

capillari e nel fluido cerebrospinale; essa raggiunge poi facilmente tutti i tessuti dell'organismo in tempi assai brevi¹².

3.3 Ruolo della luce e alterazioni del ritmo sonno-veglia dovute a luce blu

Il ciclo sonno-veglia è l'alternanza di due stati continui, regolata da:

- ritmo circadiano, che determina la distribuzione temporale dei due stati;
- processo omeostatico, che determina l'esigenza e la proporzione del sonno rispetto allo stato di veglia che lo precede.

Come afferma Maurizio Nordio *“A supporto della stretta correlazione fra il ritmo luce/buio e la secrezione ciclica della melatonina, esiste tutta una serie di evidenze sperimentali indicanti che l'esposizione ad una fonte luminosa di intensità e lunghezza d'onda adeguate, durante il periodo notturno, determina una drastica e reversibile riduzione dei livelli di melatonina fino ai valori diurni”*¹³. Dagli studi risulta che una lunghezza d'onda compresa tra i 420 nm e i 480 nm risulta essere più efficace rispetto ad una lunghezza d'onda nell'ambito del giallo e del rosso. Ovviamente bisogna tenere conto non soltanto del livello di intensità della radiazione luminosa, ma anche del tempo di esposizione.

In particolare è stato possibile documentare che l'esposizione ad una intensità luminosa di soli 200 lux (i lux si riferiscono all'illuminamento, prendono in considerazione l'oggetto illuminato e non la sorgente), dove la luce è stata generata utilizzando lampade fluorescenti bianche fredde filtrate con una lente Lexan 9030 con limitazione dei raggi UV e progettate per fornire un illuminamento uniforme all'interno della sala sperimentale, è in grado di ridurre progressivamente le concentrazioni plasmatiche di melatonina, con l'aumentare del tempo di esposizione alla luce. Anche se, l'inibizione della secrezione di melatonina è comunque dose-dipendente: intensità maggiori di luce sono in grado di determinare soppressione maggiore (Lack e Wright 2007).

Altri studi, relativi alla soppressione notturna della melatonina, hanno preso in esame 72 soggetti testati (durante la notte) con almeno sette differenti radiazioni monocromatiche (radiazioni di lunghezze d'onda comprese tra 420 e 460 nm); i risultati hanno riportato che, negli esseri umani, la regione di lunghezza d'onda 446-477 nm è quella che maggiormente fornisce input circadiani per regolare la secrezione di melatonina, con una risposta massima a λ pari a 460 nm (intensità superiori e pari a $3,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ hanno provocato significative soppressioni di melatonina), suggerendo l'esistenza di un nuovo fotopigmento (la melanopsina) diverso da quelli dei coni e dei bastoncelli, fattore chiave nella fotoregolazione dei livelli di melatonina (Brainard et al. 2001).

¹² [Melatonina: azioni ed utilità nell'uomo](#)

¹³ [Melatonina: azioni ed utilità nell'uomo](#)

Nel 2014 Anne-Marie Chan, ricercatrice dell'ospedale universitario di Boston, ha pubblicato un articolo intitolato "Evening use of light-emitting E-Readers negatively affects sleep, circadian timing, and next-morning alertness".

Nella ricerca sono stati monitorati 12 giovani (6 maschi e 6 femmine) di età compresa tra i 23 e i 27 anni. Questi soggetti sono stati introdotti in una stanza con luce soffusa. Ad un gruppo è stato chiesto di leggere dei libri utilizzando un dispositivo elettronico (iPad e non e-book a inchiostro elettronico che non emettono luce); all'altro gruppo è stato chiesto di leggere libri in formato cartaceo. Entrambi i gruppi dovevano leggere nelle 4 ore antecedenti il sonno per 5 notti consecutive. Ad ogni partecipante sono state garantite 8 ore di sonno.

I parametri misurati sono stati:

- Secrezione di melatonina
- EEG(elettro encefalogramma) durante sonno e veglia
- Feedback e sensazioni dei partecipanti tramite questionario

I risultati finali hanno dimostrato che leggere un libro su un dispositivo elettronico nelle ore antecedenti il sonno riduce la sonnolenza del soggetto, sopprime la produzione di melatonina nel periodo notturno, altera l'ottimale profilo notturno dell'elettro encefalogramma e peggiora la vigilanza mattutina (Chang et al. 2014).

Ricercatori della 'School of Psychology' dell'Università di Glasgow nel Regno Unito hanno effettuato degli studi sulle associazioni tra l'uso dei social media (di conseguenza smartphone, computer, ecc.) e i modelli di sonno in un ampio numero di adolescenti, controllando una vasta gamma di variabili. Sono stati presi in esame i dati di 11872 adolescenti (di età compresa tra 13 e 15 anni). L'obiettivo dello studio è stato quello di valutare sei parametri fondamentali:

- Inizio del sonno e orario del risveglio (nei giorni di scuola e nei giorni liberi)
- Latenza dell'inizio del sonno (tempo impiegato per addormentarsi);
- Difficoltà a riaddormentarsi dopo il risveglio notturno.

Gli studiosi hanno suddiviso i soggetti esaminati in varie categorie a seconda del tempo di utilizzo dei social media:

- Basso utilizzo (< 1 ora → 33,7%, n = 3986);
- Medio utilizzo (da 1 a <3 ore → 31,6%, n = 3720)
- Elevato utilizzo (da 3 a <5 ore → 13,9%, n = 1602)
- Utilizzo molto elevato (5+ ore → 20,8%, n = 2203).

Sebbene il presente studio si focalizzi maggiormente sulla psicologia dei soggetti esaminati, sull'importanza degli aspetti emotivi e cognitivi dell'uso dei social media che possono rendere più complicato disconnettersi da questi prima di coricarsi, nel complesso si è visto che l'uso più intenso

dei social media è stato comunque associato a modelli di sonno più poveri. Ad esempio, gli adolescenti con un utilizzo molto elevato di social media erano più propensi, rispetto agli utenti di medio utilizzo, a segnalare l'inizio del sonno tardivo, un tardo risveglio nei giorni di scuola e ad avere maggiori problemi a riaddormentarsi dopo il risveglio notturno (Scott et al. 2019). I risultati indicano, quindi, associazioni statisticamente significative tra l'uso dei social media e i modelli di sonno, in particolare un ritardo nell'inizio del sonno. In conclusione non è da escludere che i risultati ottenuti da questo studio possano essere comunque collegati ad una maggiore esposizione alla luce blu, diretta conseguenza del maggiore utilizzo dei social media, quindi dei dispositivi digitali.

Altre conferme di quanto detto sono date da una recente ricerca presentata alla riunione annuale della Società Europea di Endocrinologia, ECE 2019. In particolare gli studiosi affermano che limitando l'esposizione all'emissione di luce blu di questi schermi nel corso della sera può aiutare gli adolescenti a migliorare la qualità del sonno e in generale a ridurre l'affaticamento e la mancanza di concentrazione, nonché il cattivo umore, nel corso della giornata. E questo dopo solo una settimana di trattamento secondo lo studio realizzato dall'Istituto olandese di neuroscienze, l'UMC di Amsterdam e l'Istituto nazionale olandese per la salute pubblica e l'ambiente. I ricercatori hanno infatti studiato gli effetti dell'esposizione agli schermi, in particolare alla luce blu che emettono, sugli adolescenti e si sono accorti che quelli che passavano più di quattro ore al giorno davanti ad uno schermo si addormentavano in media 30 minuti più tardi la sera rispetto ai ragazzi che stavano davanti ad uno schermo per meno di un'ora al giorno. Eseguendo gli stessi esperimenti ma bloccando con speciali occhiali la luce blu emessa dagli schermi, i ricercatori si accorgevano che i ragazzi riuscivano ad addormentarsi in maniera più facile (Van Der Meijden et al. 2019).

Dirk Jan Stenvers, uno dei ricercatori impegnati nello studio, commenta: *“In base ai nostri dati, è probabile che i disturbi del sonno degli adolescenti e l'insorgenza ritardata del sonno siano almeno in parte mediati dalla luce blu degli schermi”*. Infine afferma:

I disturbi del sonno iniziano con sintomi minori di stanchezza e scarsa concentrazione, ma a lungo termine sappiamo che la perdita di sonno è associata a un aumento del rischio di obesità, diabete e malattie cardiache. Se possiamo introdurre ora semplici misure per affrontare questo problema, possiamo evitare maggiori problemi di salute negli anni a venire.

Frase, questa, che deve far riflettere e impegnare gli studiosi nella ricerca di strategie di difesa sempre più all'avanguardia.

In conclusione bisogna ricordare che:

- 380-455 nm (banda blu-violetta) è la banda di lunghezze d'onda maggiormente dannose per l'uomo (retina e ritmi circadiani)
- 465-500 nm (banda blu-turchese o banda cronobiologica) è la banda di lunghezze d'onda che regolano i ritmi circadiani quali il ritmo sonno-veglia.

In merito a questa distinzione bisogna sottolineare che la banda cronobiologica, proprio perché regolatrice dei ritmi circadiani, viene spesso etichettata come sola radiazione benefica; essa lo è nel momento in cui l'essere umano vi si espone nei limiti consentiti e negli orari della giornata in cui questo tipo di radiazione è presente anche nella luce naturale.

Per semplificare, la luce blu 'benefica':

- durante il giorno contribuisce a mantenere il soggetto vigile e sveglio grazie alla sua presenza sia a livello naturale (Sole) che artificiale (smartphone, ecc.);

- durante la sera e le ore notturne contribuisce, comunque, a mantenere il soggetto sveglio, il che non è un beneficio, perché in opposizione a quella che è la normale alternanza luce/buio dell'ambiente esterno. Ciò comporta uno sfasamento del ciclo sonno-veglia del soggetto esposto a luce blu nelle ore serali (luce artificiale), incompatibilmente con l'assenza di quest'ultima a livello naturale.

Considerando quanto appena detto e che negli ultimi anni è aumentato l'utilizzo dell'illuminazione artificiale, in particolare quella a LED, e l'utilizzo dei dispositivi digitali che sfrutta questo tipo di luce, non si può sottovalutare il problema e affrontarlo senza essere informati degli effetti che provoca. Nel prossimo capitolo si vedranno, dunque, alcune possibili strategie di difesa.

CAPITOLO IV: Strategie di difesa

4.1 Agire sul dispositivo e/o sul sistema di illuminazione

Per "dispositivo e/o sistema di illuminazione" si intende il dispositivo emettitore della radiazione blu (smartphone, PC, ecc.) e/o il sistema di illuminazione presente nell'ambiente (sia esterno che interno).

Agire sul dispositivo

Ad oggi, numerose aziende tecnologiche hanno permesso l'introduzione di applicazioni o appositi filtri integrati nei dispositivi digitali quali smartphone, PC, tablet ecc. che permettono, almeno in parte, di ridurre l'esposizione alla componente 'blu' della radiazione luminosa emessa da questi. Il consiglio più valido è quello di evitare l'esposizione a questo tipo di dispositivi nelle ore precedenti il sonno e più in generale per troppe ore durante le fasi in cui all'esterno è buio. Un consiglio difficilmente compatibile con le esigenze della vita moderna, che ci portano ad utilizzare gli smartphone come una delle ultime cose che si fa prima di andare a letto. Nell'impossibilità, anche per ragioni lavorative, di evitare l'esposizione ai display di smartphone, PC e tablet nelle ore serali, esistono delle soluzioni che permettono di mitigare gli effetti della luce blu o di eliminarli del tutto.

Esistono, dunque, alcuni programmi per differenti dispositivi, ma anche funzionalità integrate nei principali sistemi operativi che permettono di filtrare in modo più netto le componenti della luce

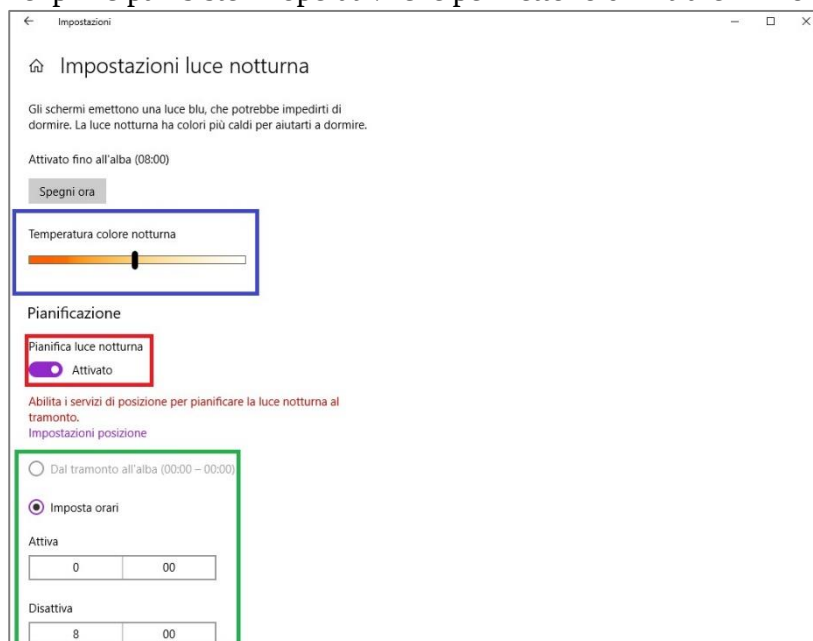


Figura 18. Schermata di Windows 10 per impostare la 'luce notturna'

essere attivata tramite le impostazioni e anche personalizzata, decidendo quanto caldo sarà il colore dello schermo al momento opportuno (figura 18).

Inoltre, attivando i servizi di posizione, il sistema attiverà automaticamente la modalità 'luce notturna' quando il sole tramonta per spegnerla, poi, quando il sole sorge al mattino successivo. Altrimenti è comunque possibile impostare orari personalizzati manualmente.

Qualsiasi iPhone, iPad e iPod aggiornato almeno alla versione 9.3 del sistema iOS include la funzione 'Night shift' che funziona come la modalità attivabile su Windows 10, con la possibilità di impostarne l'abilitazione automatica oppure scegliere manualmente un orario di inizio e di fine e selezionare la temperatura di colore.

Per quanto riguarda l'altro colosso dei sistemi operativi, Android, ha anch'esso introdotto funzionalità integrate per bloccare la luce blu. Alcuni smartphone integrano già in origine una modalità simile a Night Shift: per esempio Xiaomi ha la "modalità lettura" attivabile dalla tendina delle notifiche con le relative impostazioni, così come Asus e tante altre case produttrici implementano questo tipo di soluzione. Per i dispositivi privi di soluzioni integrate, esistono app di terze parti scaricabili dai relativi Store che possono sopperire a questa mancanza e uno dei sistemi più diffusi è Twilight.

Altre soluzioni sono state messe in campo da Nowave, noto marchio italiano che si è concentrato su questo tipo di prodotti e che propone occhiali di qualità e pellicole per praticamente tutte le dimensioni di display maggiormente in uso su desktop e portatili. Le pellicole modificano

blu: la soluzione mitiga in parte il problema, ma per la natura stessa del tipo di filtraggio è efficace solo in parte. Questo tipo di azione creerà un effetto giallognolo sullo schermo, alterando quindi i suoi colori, ma permetterà di ridurre i possibili effetti indesiderati già descritti nei capitoli II e III.

Su Windows 10 la modalità 'Luce notturna' è parte integrante delle funzionalità del sistema; può

leggermente il profilo colore del display, per cui potrebbero essere la scelta adatta per chi deve utilizzare pannelli calibrati.

Nonostante ci si trovi in un campo di applicazione in cui l'ottico/optometrista non può intervenire in prima persona, fa comunque riflettere il fatto che le grandi multinazionali si stiano prodigando per rendere più sicuri e meno dannosi gli schermi a luce LED; il che ci fa capire che il fenomeno è di portata globale e non è del tutto sottovalutato.

Agire sul sistema di illuminazione

Non è solo la luce blu intensa e diretta degli schermi ad avere effetti sui ritmi circadiani e sulla salute umana: sono soprattutto la carenza di luce naturale e l'illuminazione artificiale degli ambienti dove l'uomo abita e lavora che lo condizionano. L'obiettivo è fare in modo che la luce artificiale possa integrare quella naturale quando non è sufficiente, oppure sostituirla del tutto quando questa è assente durante le ore diurne, per garantire dei cicli di illuminazione simili a quelli che si era abituati ad avere tanti anni fa, finché, dopo la seconda rivoluzione industriale, la maggior parte della popolazione si è spostata a lavorare in ambienti chiusi anziché all'aperto o nelle campagne.

Il Lighting Research Center (LRC) nello Stato di New York, è uno dei più importanti centri di ricerca al mondo sulla luce e sulle sue applicazioni pratiche. Tra i temi su cui più spesso Figueiro e gli altri studiosi del LRC hanno effettuato ricerche e sperimentazioni, negli ultimi anni, documentate da pubblicazioni scientifiche e attività di divulgazione, c'è il ruolo che la luce blu ha nel turbare i ritmi sonno-veglia degli utenti.

Secondo Maurizio Rossi, direttore del master in Lighting Design & LED Technology al Politecnico di Milano: *“Oggi è sicuramente più facile ottenere una buona illuminazione, una human-centric-lighting rapportata alla fisiologia dell'individuo, e lo si può fare anche in maniera più efficiente dal punto di vista energetico”*¹⁴.

Ma cosa significa Human Centric Lighting? L'associazione internazionale Lighting Europe ha dato la seguente definizione di HCL: *“Un insieme di soluzioni e sistemi di illuminazione che combinano effetti visivi, biologici ed emozionali della luce, influenzando il benessere e le prestazioni individuali delle persone”*¹⁵. Con lo Human Centric Lighting, l'uomo viene posto al centro dell'attenzione e l'illuminotecnica diventa uno strumento importante per contribuire al suo benessere, con una personalizzazione delle soluzioni sempre più avanzata.

¹⁴ [iGuzzini: luce e benessere](#)

¹⁵ www.lightingeurope.org/

Secondo l'approccio HCL, ci sono tre sfere che vengono influenzate dalla luce e dal tipo di illuminazione a cui il progettista professionista deve prestare attenzione: quella visiva, quella

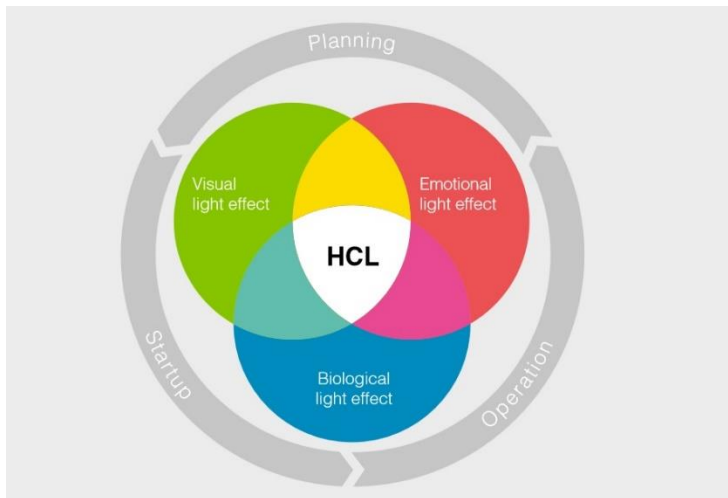


Figura 19. Le fasi di un progetto HCL – Human Centric Lighting

emotiva, quella biologica¹⁶ (figura 19).

Per fare in modo che l'illuminazione abbia effetti positivi su tutte le sfere influenzate (visiva, emotiva e biologica) è importante coordinare strettamente tutte le competenze in gioco (dall'architetto all'ingegnere, dal designer all'ottico/optometrista), attraverso opportune scelte di prodotti e materiali.

Solo un sistema di illuminazione ben studiato, gestito e funzionante in conformità con le linee guida e gli standard di riferimento, può soddisfare i bisogni delle persone.

La luce naturale viene utilizzata laddove possibile ed è molto importante; la stessa va poi miscelata e calibrata con la luce artificiale. Come afferma, ancora, Maurizio Rossi: *“Inoltre l'illuminazione artificiale non deve essere statica; deve avere una sua dinamicità, sia in termini di temperatura di colore, sia di direzione. Il primo prodotto a livello mondiale che si basava su questi principi era il SIVRA (Sistema di Illuminazione Variabile a Regolazione Automatica) di iGuzzini, alla fine degli anni Novanta”* (figura 20).



Figura 20. SIVRA (Sistema di Illuminazione Variabile a Regolazione Automatica) di iGuzzini

Dagli anni 2000 in avanti sono state effettuate diverse sperimentazioni e realizzati modelli di calcolo per valutare l'impatto circadiano della luce (tra i più interessanti, quello del Light Research Center americano)¹⁷. Al momento, però, i dati empirici su cui basarsi non sono sufficienti per trarre delle indicazioni quantitative e generalizzabili, il che non permette ancora di arrivare alla definizione

¹⁶ [HCL: illuminazione smart al servizio dell'uomo](#)

¹⁷ [LightHealth-publications](#)

di regole e normative precise in materia, anche se delle indicazioni di massima possono essere fornite. Quello che ormai è certo è che la luce può provocare uno sfasamento del ciclo giorno-notte, e quindi del ritmo circadiano, generando conseguenze importanti sulle funzioni fisiche delle persone.

Lo Human Centric Lighting assume quindi un valore di primo piano in tutti quegli ambienti in cui la luce gioca un ruolo centrale: in generale, in tutti gli spazi interni, anche quelli privati, in cui si trascorre gran parte della giornata.

Ma quali sono i benefici dello HCL?

Si distinguono per aree di applicazione in:

- visivi: miglioramento della visibilità, del comfort visivo, della sicurezza e dell'orientamento.
- biologici: aumento dello stato di vigilanza e concentrazione, miglioramento delle prestazioni cognitive, regolarizzazione del ciclo sonno-veglia.
- emotivi: miglioramento dell'umore, eccitazione, rilassamento, controllo dell'impulso.

Di seguito alcune delle conclusioni riportate dalla Prof.ssa Laura Bellia al LUMI Expo 2019, la mostra-convegno svoltasi a Bologna nel Novembre del 2019, in cui si è tenuta una conferenza di aggiornamento sul tema dello Human Centric Lighting:

In base alle sperimentazioni condotte (nota: nelle sperimentazioni si è cercato di calcolare lo “stimolo circadiano”, ossia l'efficacia relativa della ‘luce circadiana’ in grado di produrre degli effetti), si è visto che le sorgenti di illuminazione a Led determinano maggiori valori di stimoli circadiani rispetto alle sorgenti fluorescenti a parità di temperature colore (CCT) e di illuminamento all'occhio. La modifica della distribuzione spettrale della sorgente consente di modificare lo stimolo circadiano, a parità di illuminamenti all'occhio. A parità di illuminamento, le distribuzioni spettrali più ricche di lunghezze d'onda piccole sono più efficaci. Queste radiazioni hanno anche un impatto su produttività, attenzione e umore. La distribuzione spettrale dello stimolo non dipende solo dalla distribuzione spettrale della radiazione emessa dai corpi illuminanti, ma anche dalle caratteristiche ottiche delle superfici che delimitano l'ambiente e quindi da fattori di riflessione.

4.2 Agire sull'occhio

Sebbene l'occhio umano sia naturalmente predisposto (restringimento pupilla, chiusura palpebre, distoglimento dello sguardo, azione di filtraggio del cristallino) per difendersi dagli effetti dannosi della luce, esporci a lungo ai dispositivi emettitori di luce ‘blu’ può compromettere queste difese naturali e peggiorare gli effetti.

Quando si parla di ‘agire sull'occhio’, si fa riferimento all'utilizzo di filtri anteposti sull'apparato che riceve la luce dannosa piuttosto che sull'apparato che la produce. La soluzione è quella di anteporre un filtro davanti all'occhio (occhiale) oppure nell'occhio stesso (lente a contatto) che limiti la quantità di luce blu che raggiunge l'organo in questione; bisogna, però, fare attenzione nel filtraggio ed evitare di causare altri tipi di problemi. Le lenti con filtro blu bloccante possono rendere il mondo intensamente giallo o arancione ed essere poco accettate: eliminando la componente ‘blu’, è chiaro che chi manifesta il proprio effetto è il colore contrapposto cioè il giallo, anche se il

cervello rapidamente mette in atto un meccanismo di adattamento per non lasciare al soggetto la percezione di un colore alterato, visto che si tratta di assorbimenti bassi.

Così come nel mondo della tecnologia, anche nel mondo dell'ottica oftalmica le numerose aziende hanno provveduto alla realizzazione di trattamenti, analizzati più avanti, che vengono posti sulle lenti come una qualsiasi tipologia di antiriflesso e che vanno a bloccare, o a diminuire fortemente la quantità di luce blu che raggiunge l'occhio. Questi trattamenti di solito sono realizzati tramite l'aggiunta sulla lente di più strati protettivi. Bisogna ricordare che le lenti nei confronti della luce hanno 3 principali interazioni: la rifrangono (la luce vi passa attraverso), la assorbono (lenti colorate) e la riflettono.

Si può, dunque, optare per delle lenti che **assorbano** le frequenze 'blu' e lascino passare le altre frequenze (quindi lente gialla): sono lenti che aumentano i contrasti delle immagini ma che modificano la percezione dei colori. Come si è visto precedentemente, un occhio ha delle superfici refrattive trasparenti che col passare degli anni tendono ad ingiallire; questo comporta una diminuzione della qualità della visione, ma un aumento dell'assorbimento della banda elettromagnetica nel blu. Per lo stesso motivo le lenti con trattamenti per ridurre la luce blu tendono ad essere di una colorazione lievemente giallina.

L'altra opzione è quella di poter trattare le lenti in modo che **riflettano** parte di quelle frequenze ottenendo un riflesso blu/viola. Tale opzione è quella che ha recentemente preso più piede, dato che l'impatto estetico è più tenue e la percezione dei colori subisce meno variazioni.

Recentemente sono stati anche immessi sul mercato **materiali ad alta protezione ottica**, la cui funzionalità sarà vista più avanti.

Come orientarsi quindi tra le proposte che oggi il mercato offre per un'adeguata protezione?

Per potersi orientare correttamente su quello che fa un filtro/lente è fondamentale saper interpretare

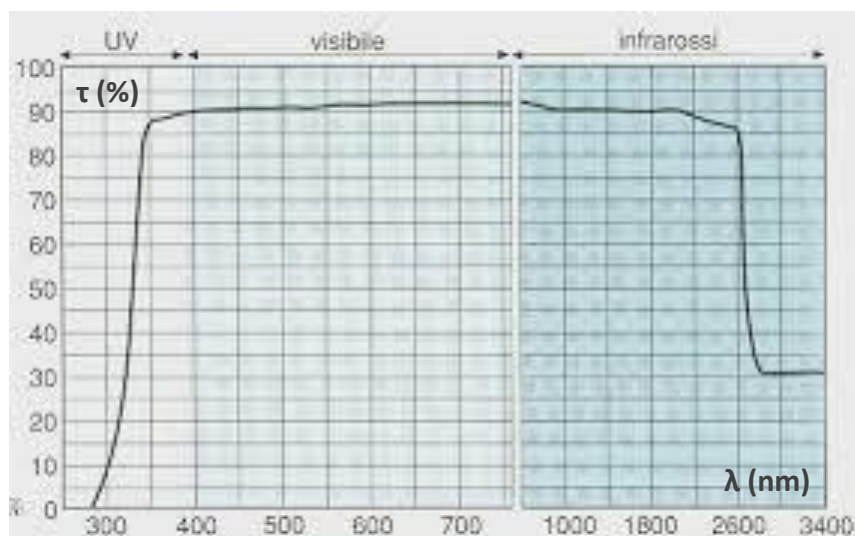


Figura 21. Diagramma di trasmissanza di un generico filtro/lente.

il diagramma di trasmissanza dell'ausilio in esame, cioè il diagramma che rappresenta l'andamento percentuale della trasmissanza al variare della lunghezza d'onda. Per trasmissanza (τ) in ottica e in spettroscopia, si intende la capacità di un materiale di lasciarsi attraversare da una parte della luce incidente; essa



Figura 22. Curva di trasparenza alla radiazione luminosa di una lente colorata da sole con eliminazione della radiazione più dannosa e riduzione della intensità luminosa che raggiunge l'occhio.

oculare desiderata; si evidenzia infatti come la trasmittanza sia massima da circa 300nm, cioè in un range che fa ancora parte dell'UV. Per contro, in questa seconda immagine (figura 22) è rappresentato il diagramma di un filtro/lente da sole (tinta grigia) che taglia totalmente la radiazione UV. Osservando sempre la figura 22, va evidenziato che la riduzione della trasmittanza nel visibile non modifica il taglio sull'UV il quale dipende dal polimero con cui è stato costruito il filtro/lente o eventuali trattamenti che potrebbero essere fatti. In sintesi la colorazione del filtro/lente (qualunque sia la sua tinta) va a modificare la trasmittanza nella zona del visibile con riduzione dell'abbagliamento ma non modifica la protezione della stessa.

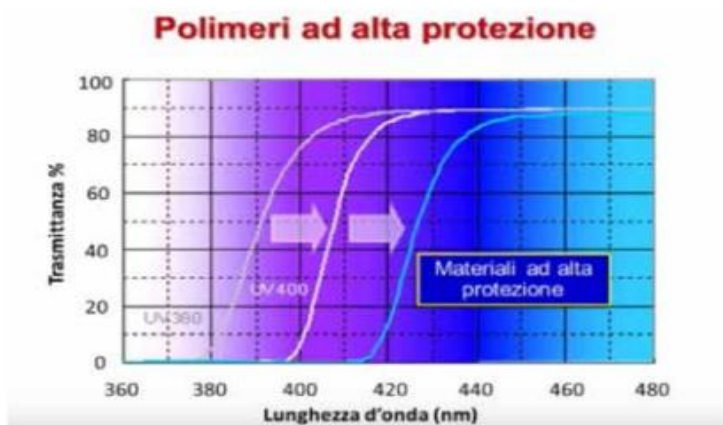


Figura 23. Curva di trasparenza alla radiazione luminosa di una lente da vista ad alta protezione non colorata con eliminazione delle componenti energetiche più dannose.

radiazioni che fanno parte della "luce blu" si può notare che un filtro/lente ad alta protezione ottica non è altro che un filtro che, rispetto ad altri materiali, trasla la curva con trasmittanza spettrale elevata a partire da circa 415 nm (figura 23); elimina cioè le lunghezze d'onda del primo visibile ancora significativamente energetiche. Facendo una selezione di quelli che sono i contributi energetici della radiazione tra 400 e 420 nm, si ha un'attenuazione di oltre il 90%. Quindi se il filtro/lente viene

è, quindi, il rapporto tra intensità del flusso radiante trasmesso e intensità del flusso radiante incidente. Da quanto detto sin ora, una lente dovrebbe tagliare totalmente le radiazioni UV e attenuare le zone del primo visibile dove si localizzano i picchi di emissione dei dispositivi elettronici sopra citati. L'immagine (figura 21) rappresenta il digramma di un filtro/lente che sicuramente non offre la protezione

Come anticipato, da qualche anno sono stati introdotti sul mercato dei materiali "ad alta protezione ottica" mentre alcune aziende effettuano specifici trattamenti superficiali per attenuare l'effetto della radiazione "blu". Ma qual è la differenza tra un materiale ad alta protezione ottica e l'effetto di un trattamento contro la luce blu? Analizzando lo spettro di tutte le

realizzato con un materiale ad alta protezione, non solo vengono eliminate le radiazioni UV, ma anche la parte più energetica delle radiazioni HEV¹⁸.



Figura 24. Zona di azione di un trattamento di controllo del blu.

banda compresa tra 400-420 nm che trasporta ancora grosse quantità di energia. Tagliare quantità maggiori non permette, oggi, alla lente di rimanere “bianca”. Una lente con **trattamento di controllo del blu** riduce, parzialmente, le radiazioni tra 400-420 nm e soprattutto attenua i picchi di emissione dei dispositivi elettronici che emettono intorno a 440-555nm.

Un’eliminazione ancora più consistente dello spettro del blu richiederebbe l’uso di una lente fotoselettiva per patologie oculari con non poche conseguenze. Ci si potrebbe chiedere perché, anziché tagliare fino a circa 420 nm, non ci si sposta con la curva di trasmissione direttamente fino a 440-450 nm; e perché una lente che attenua il blu non viene realizzata per far passare ancora meno queste radiazioni. Ciò, ad oggi, non è possibile perché altererebbe il “colore” delle lenti, che avrebbe una tinta dipendente da come e dove viene modificato, in lunghezza d’onda, il diagramma di trasmissione della lente. Se si volessero tagliare tutte le radiazioni che causano problematiche visive

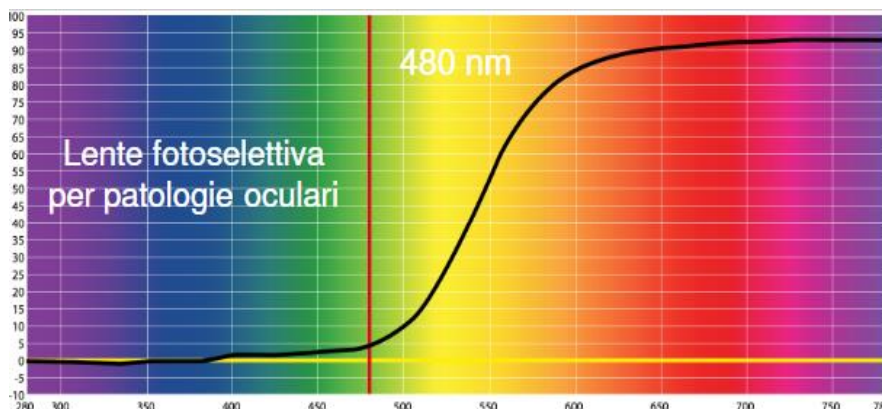


Figura 25. Diagramma di trasmissione di una lente fotoselettiva per patologie oculari con taglio a 480nm.

Quando si utilizzano lenti con trattamenti contro la “luce blu”, si va ad agire sui picchi di emissione dei dispositivi presi in considerazione nei paragrafi precedenti. Nell’immagine (figura 24) viene illustrato come un trattamento “controllo del blu” va a incidere sulla parte alta della curva di trasmissione a circa 430/450 nm.

In sintesi, una lente ad **alta protezione ottica** taglia una buona parte della luce blu nella

e non, si potrebbe utilizzare una lente fotoselettiva per patologie oculari, entrando in un settore (l’ipovisione) diverso da ciò che si sta trattando in questo lavoro di tesi. Nell’immagine (figura 25), viene riportato il diagramma di trasmissione di

¹⁸ www.issuu.com/marcofabiano/docs/supplemento_b2eyes_luce_blu_bassa

una lente per patologie oculari con taglio a 480 nm; la lente risulterebbe arancione, non idonea alla guida e con altri tipi di problematiche per un soggetto normovedente.

Saranno elencate di seguito le soluzioni che alcune aziende, operanti nel campo dell'ottica oftalmica, hanno messo in campo soluzioni a disposizione del portatore.

- L'azienda HOYA ha realizzato il trattamento "BlueControl" che agisce nella zona tra 445 e 455 nm (picco di emissione dei dispositivi digitali). Lavora per riflessione, quindi ha una modulazione di risposta a seconda della quantità di luce che arriva sulla lente¹⁹. Una ricerca ha dimostrato che l'80% delle persone ha riscontrato subito importanti miglioramenti nella visione grazie alle lenti BlueControl (Brown 2012).
- "DuraVision BlueProtect" di ZEISS è un trattamento sviluppato specificamente per chi trascorre molto tempo in ambienti chiusi ed è esposto alla luce blu-violetta dei LED o degli schermi di televisori, computer e tablet. Il trattamento riflette parte della luce blu-violetta emessa da fonti di luce artificiali, evitando che giunga all'occhio, riduce la trasmissione nello spettro di 380-455 nm (rischio da luce blu) a un valore BPI (blue protect index) pari a 15, mantenendo il livello di

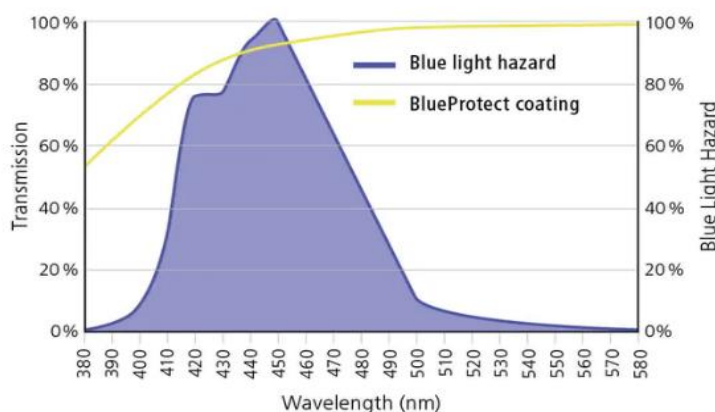


Figura 26. Spettro d'azione del trattamento BlueProtect.

trasmissione elevato e superiore a 460 nm (figura 26). Un aspetto importante da considerare è legato all'esigenza del cliente finale. Se la necessità primaria è una protezione in interni, allora un trattamento superficiale può servire a riflettere parte di luce blu prodotta dai dispositivi digitali. Se la persona è spesso all'esterno, invece, è necessaria una colorazione selettiva che possa tagliare totalmente la luce blu prodotta dal Sole, mentre una lente fotocromatica Photofusion con trattamento BlueProtect è la giusta soluzione perché integra le esigenze sia in interni sia in esterni²⁰.

- L'azienda ESSILOR nel 2013 ha sviluppato Crizal Prevencia, il trattamento antiriflesso che filtra le frequenze nocive della luce blu. Nel 2016 ha messo in campo Eye Protect System, non un trattamento antiriflesso, bensì un innovativo sistema di protezione degli occhi dagli effetti nocivi dei raggi UV e della luce blu-viola integrato in una lente estetica e trasparente. La tecnologia che consente una protezione mirata dalla luce blu-viola nociva è Smart Blue

¹⁹ www.hoyavision.com/it/prodotti/per-i-professionisti/trattamenti-antiriflesso/per-lo-stile-di-vita-digitale/

²⁰ www.zeiss.it/vision-care/ottici-optometristi/prodotti/trattamenti/duravision-blueprotect.html

Filter. Un filtro che, assorbendo in modo selettivo le frequenze blu-viola più nocive, consente un'efficace protezione mirata, una percezione non alterata dei colori e una lente trasparente. L'efficacia è garantita dalla presenza di speciali molecole di colore complementare che neutralizzano il colore residuo giallastro conseguente all'assorbimento della luce blu-viola. In particolare Eye Protect System riduce la trasmissione di quelle frequenze di luce blu tra 415 e 455 nm, trasmettendo allo stesso tempo il 96% di luce blu-turchese essenziale per il benessere dell'organismo²¹.

- L'azienda TOKAY ha sviluppato Lutina, un meccanismo innovativo che si basa sulla capacità di bloccare i raggi UV e HEV fino a 420 nm, garantendo una protezione dell'occhio pari al 94% e permettendo una riduzione dello stress ossidativo. I test scientifici su lenti Tokai dimostrano che solo il 5.89% dei raggi con lunghezze d'onda di 400-420 nm sono in grado di passare attraverso la lente Lutina. Il materiale esclusivo delle lenti Tokai assorbe la luce blu e i raggi ultravioletti, riducendo così l'abbagliamento,

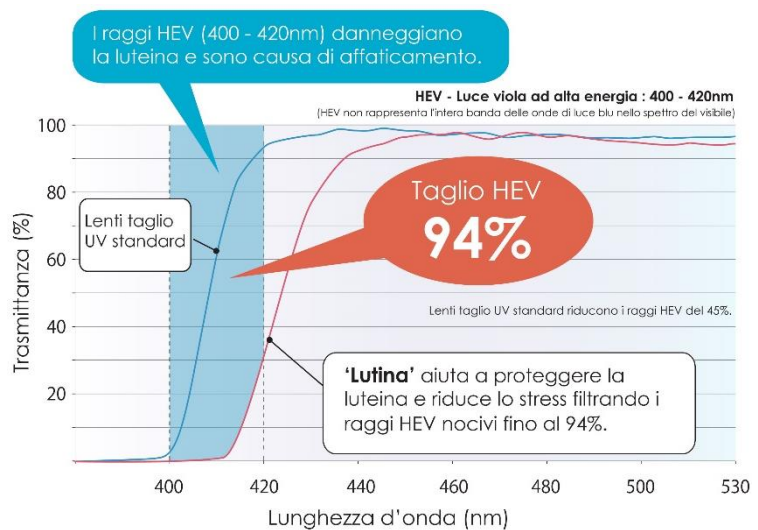


Figura 27. Spettro d'azione del trattamento Lutina.

migliorando il contrasto e rilassando gli occhi. Le caratteristiche di Lutina garantiscono una protezione totale dai raggi UV e, fino al 94%, dai raggi HEV, i quali danneggiano la luteina dell'occhio e sono responsabili della degenerazione maculare senile. La luteina è una molecola di origine naturale che appartiene alle xantofille, una serie di sostanze appartenenti chimicamente alla famiglia dei carotenoidi. Nell'uomo, come in tutti i mammiferi, questa sostanza non viene sintetizzata e per questo motivo deve essere assunta mediante la dieta per riceverne la quantità necessaria per il fabbisogno giornaliero. Dal punto di vista fisiologico, la luteina è coinvolta in numerose attività utili all'organismo; le attività riconosciute alla luteina sono la prevenzione dai danni fototossici causati dall'assorbimento della luce blu, proprietà antinfiammatorie, stabilizzazione e rafforzamento delle membrane cellulari. La luteina è localizzata nella macula, la zona centrale della retina e il ruolo principale è quello di assorbire la luce ad alta energia per proteggere l'occhio, facendo da schermo dalle radiazioni

²¹ www.essiloritalia.it/prodotti/eye-protect-system

e impedendone il loro passaggio ai fotorecettori della retina. Per quanto riguarda la sua funzione antiossidante, la luteina permette di prevenire la perossidazione lipidica. Quando i raggi ultravioletti e la luce blu ad alta energia penetrano nell'occhio, si formano delle specie chimiche molto aggressive (i radicali liberi), che vanno a danneggiare le strutture biologiche. Il ruolo della luteina è di inibire tale processo, svolgendo un'attività anti-radicalica e impedendo lo stress ossidativo causato dalle specie reattive dell'ossigeno²².

In conclusione bisogna sottolineare che della “luce blu” non è possibile dare una definizione generalizzata, perché a seconda della lunghezza d'onda ha impatti differenti. Pertanto la luce blu può essere generalizzata come comunicazione di partenza, ma poi andrebbe differenziata a seconda delle necessità per cui è pensato un prodotto. La filtratura della luce blu deve essere, quindi, compiuta in modo intelligente ricordando che essa appartiene pur sempre allo spettro visibile e non deve essere eliminata del tutto. Questo comporterebbe una visione alterata della realtà, vista la mancanza di un colore e anche un'alterazione dei ritmi circadiani. Un filtro sbagliato potrebbe ridurre la luce visibile che arriverebbe sulla retina provocando midriasi e non tagliando l'ultravioletto, situazione sicuramente più pericolosa per il nostro occhio.

CAPITOLO V – Analisi dei filtri in commercio con OSRAM Color Calculator

5.1 Campioni analizzati

L'analisi dei campioni è avvenuta prendendo in considerazione gli spettri di trasmittanza dei trattamenti “luce blu” resi pubblici da alcune delle aziende già citate in precedenza. In particolare sono stati analizzati i seguenti filtri:

- “Dura Vision Blue Protect” dell'azienda Zeiss;
- “Lenti Lutina” dell'azienda Tokay;
- “Smart Blue Filter” dell'azienda Essilor;
- generico filtro per patologie oculari con taglio a 480 nm.

5.2 Metodo di analisi

Lo scopo è quello di studiare, seppur in modo non accurato, il reale effetto che i filtri hanno nei confronti della radiazione “blu” e in che modo questi possano modificare la percezione dei colori. L'analisi è stata effettuata tramite Color Calculator, un software sviluppato da OSRAM SYLVANIA che aiuta i progettisti nello sviluppo di numerose soluzioni di illuminazione LED. Per lo studio

²² www.tokai-italia.it/materiali/lutina/

dell'efficacia dei filtri contro la luce blu è stata presa in considerazione come fonte emissiva un LED con CCT (temperatura di colore correlata) pari a circa 4800K (bianco freddo), mentre per quanto riguarda l'analisi del filtro per patologie oculari, è stata utilizzata luce naturale a 6500 K. L'aspetto pratico ha richiesto, quindi, la scelta della sorgente (in questo caso LED a 4800 K e luce naturale a 6500 K) già fornita di base dal software e la scelta del filtro da analizzare. Ogni filtro scelto è stato caricato nel software manualmente, inserendo i valori di trasmittanza relativi alle diverse lunghezze d'onda (da 360nm a 830 nm). Bisogna, però, sottolineare che l'accuratezza dei valori di trasmittanza inseriti non è massima in quanto non si ha certezza che le immagini degli spettri di trasmittanza pubblicate dalle aziende riproducano fedelmente il comportamento dei filtri. Pertanto i dati personalmente ricavati sono da considerarsi al di fuori di qualsiasi studio che ogni azienda già effettua sui propri prodotti. Nel paragrafo successivo saranno illustrati gli effetti che i filtri hanno sugli spettri di emissione delle sorgenti selezionate.

5.3 Risultati

Campione 1 (Dura Vision Blue Protect): dall'analisi dei risultati ottenuti si evince che il trattamento in questione riduce lievemente (circa 10%) il picco nella zona maggiormente dannosa (430 nm) e lascia invariata la componente emessa dal LED prima dei 400 nm (UV) e dopo i 450 nm (banda cronobiologica). Inoltre la CCT scende da 4800 K a 4690 K. Nel grafico 1 è rappresentato lo spettro di emissione della sorgente scelta, mentre nel grafico 2 viene rappresentato lo stesso spettro dopo aver applicato il filtro.

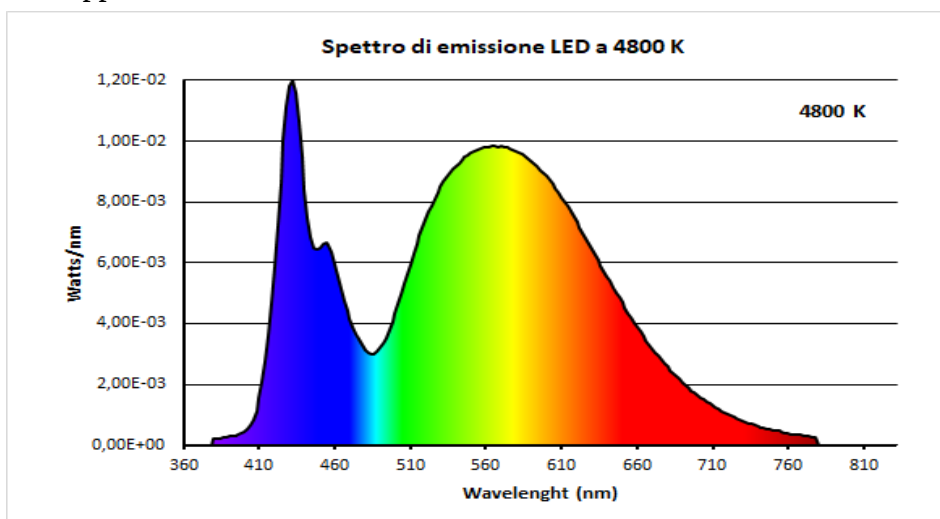


Grafico 1. Spettro LED a 4800 K.

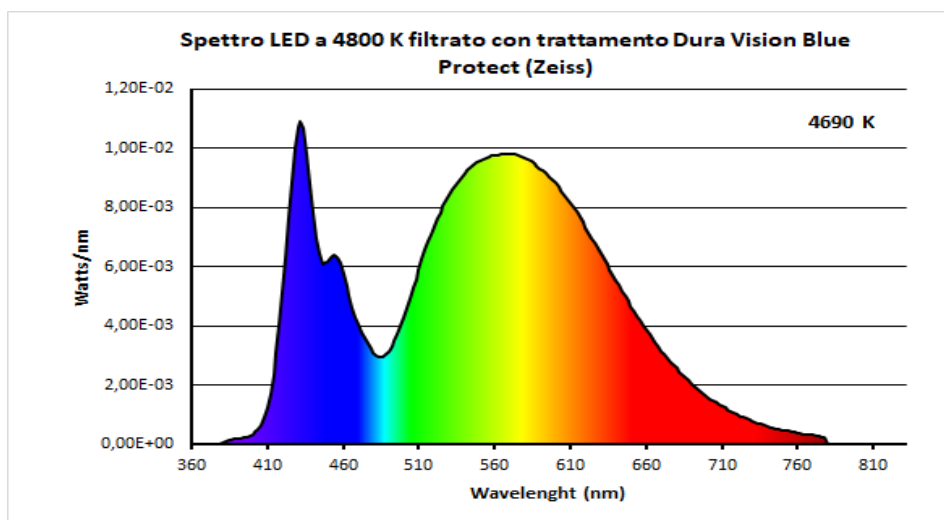


Grafico 2. Spettro LED modificato con filtro Dura Vision Blue Protect.

Campione 2 (Lenti Lutina): nel grafico 3 si può notare come il filtro, a differenza del precedente, abbia un'azione di taglio completa per le lunghezze d'onda al di sotto dei 410 nm (UV). Inoltre per la componente relativa alla zona considerata maggiormente dannosa (430nm) si ha una riduzione maggiore e corrisponde al 16% circa della potenza emessa dal LED senza filtro (grafico 1). Anche in questo caso non c'è un'azione significativa sulla banda cronobiologica. La CCT, invece, si riduce a 4663 K.

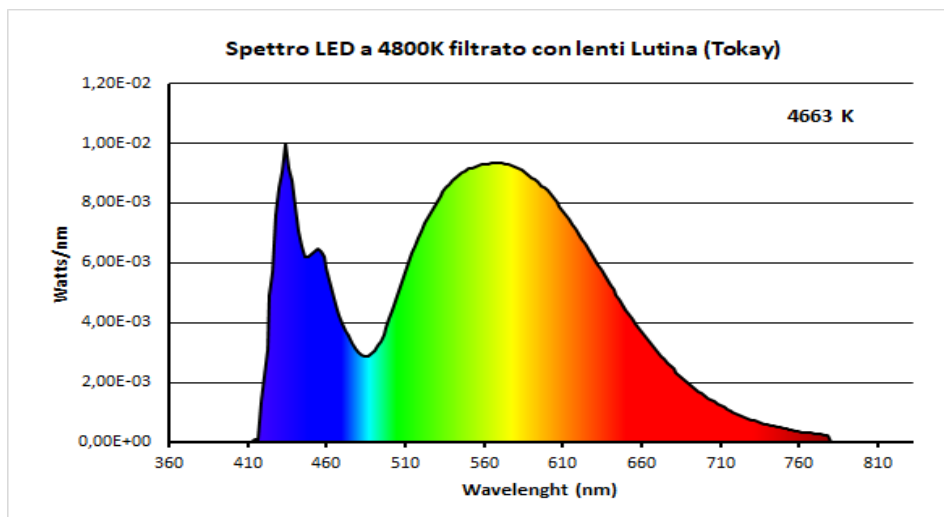


Grafico 3. Spettro LED modificato con lenti Lutina.

Campione 3 (Smart Blue Filter): analizzando i risultati ottenuti, come si può visionare nel grafico 4, il seguente filtro è quello che maggiormente riduce il picco di emissione nella zona dannosa (430nm); infatti si ha una riduzione della potenza emessa dal LED di circa il 32%. Il filtro non ha un'azione significativa sulle lunghezze d'onda inferiori a 400 nm ma, diversamente dagli altri, riduce del 20%

ca. anche la zona compresa tra 450-460 nm. La CCT in questo caso viene ridotta di 300 K, avvicinandosi alla temperatura di colore di un LED bianco neutro.

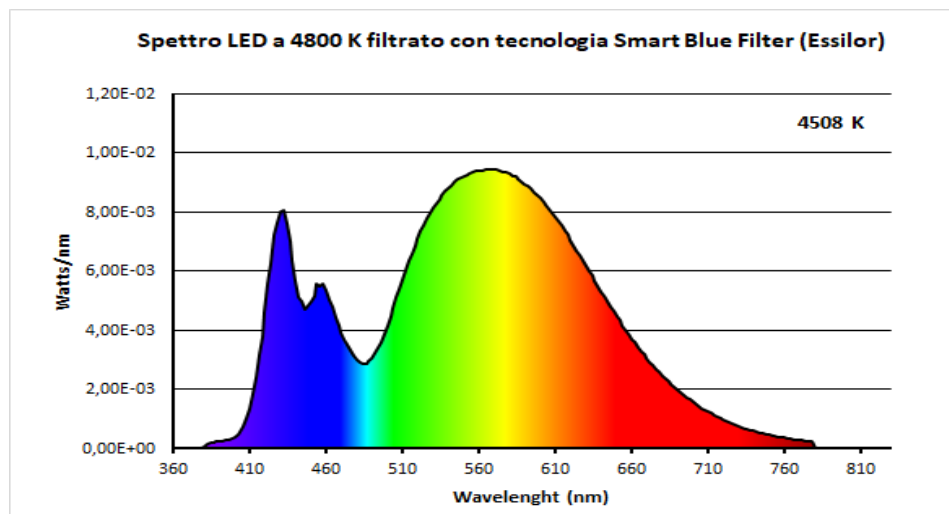


Grafico 4. Spettro LED modificato con Smart Blue Filter.

Campione 4 (lente fotoselettiva per patologie oculari): nel grafico 5 è rappresentato lo spettro di emissione della luce naturale presa come sorgente di riferimento per testare l'effetto della lente fotoselettiva per patologie oculari. Nel grafico 6 si può osservare il taglio netto di tutte lunghezze d'onda al di sotto dei 480 nm (luce blu e UV). Questo tipo di lente, seppur molto vantaggiosa dal punto di vista protettivo per le lunghezze d'onda più nocive, non è utilizzabile per soggetti normovedenti. Infatti, come già anticipato, essa sarebbe una lente arancione (vedi grafico 7) che altera la percezione dei colori. La CCT della luce solare (6500 K) scende a 2373 K, inoltre il CRI (indice di resa cromatica) passa da 100 a 77: ciò si traduce in uno snaturamento dei colori degli oggetti osservati.

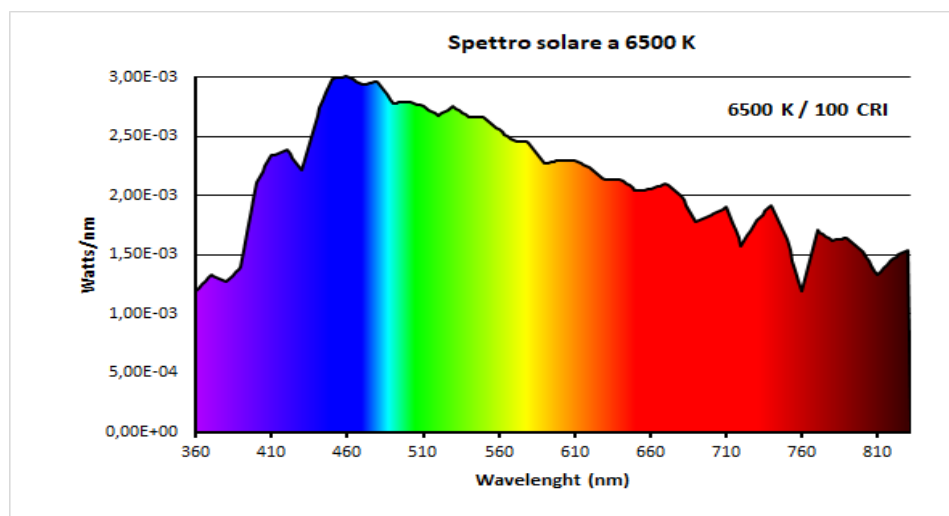


Grafico 5. Spettro della luce naturale a 6500 K.

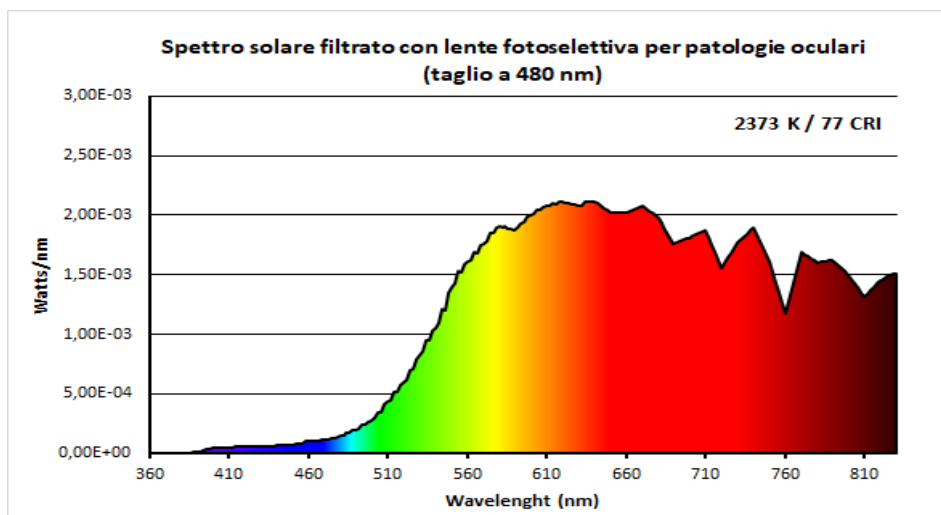


Grafico 6. Spettro solare modificato con lente fotoselettiva per patologie oculari.

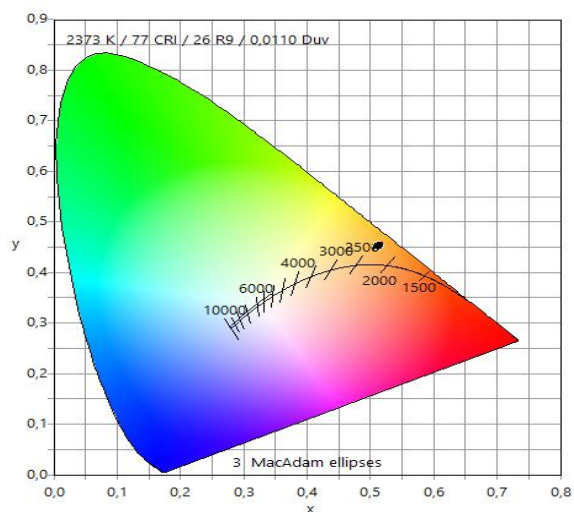


Grafico 7. Diagramma CIE riportante CCT e CRI della lente fotoselettiva per patologie oculari.

Dai risultati ottenuti sembra che i trattamenti che più rispettano i criteri di filtraggio e di selezione della radiazione maggiormente dannosa siano quelli dei campioni 2 e 3, in cui l'UV viene completamente tagliato e la componente "blu" di un LED a 4800 K viene ridotta fino al 32%, senza alterare in alcun modo la percezione dei colori.

Conclusioni

Al termine di questo lavoro di tesi si può prendere coscienza del fatto che, come afferma l'ottico e optometrista Roberto Zanardi:

L'uomo nel suo percorso evolutivo terrestre ha modificato completamente i suoi stili di vita fino ad essere in netto contrasto con le funzioni originali del proprio corpo. L'uomo è diventato sempre più statico, utilizzando sempre di più la visione centrale e ravvicinata, abbandonando quasi completamente la visione da lontano e periferica. È entrato in rottura con il ciclo circadiano a causa degli spostamenti intercontinentali e del vasto utilizzo di strumenti tecnologici da vicino auto illuminanti che emettono frequenze che possono interferire negativamente sul ciclo della melatonina, conseguentemente del sonno²³.

È chiaro e scientificamente provato che il crescente aumento dell'esposizione alla luce blu a causa di smartphone, tablet, pc, televisori LCD e quant'altro porta inevitabilmente ad una maggior probabilità di riscontrare tutte le problematiche patologiche riportate dagli studi nei capitoli precedenti. Diversamente, nonostante siano numerosi gli studi effettuati sull'argomento per ricercare un legame tra l'esposizione alla luce blu e l'insorgenza di scompensi circadiani, nessuno di questi, ad oggi, è riuscito in modo scientifico a correlare con certezza i due fenomeni, in quanto le variabili da controllare in uno studio del genere sono di numero molto elevato. È opportuno, quindi, e fortemente consigliato effettuare sempre più ricerche sull'uso smisurato dell'illuminazione a LED: oggi circa l'83% delle informazioni che arrivano al cervello passano dagli occhi. Si rendono, inoltre, necessari nuovi studi clinici che valutino l'efficacia dei trattamenti utilizzati dalle aziende di lenti oftalmiche; infatti, come evidenzia l'analisi dei filtri in commercio effettuata dal presente lavoro di tesi, non tutti i filtri "luce blu" hanno lo stesso comportamento nei confronti di queste radiazioni. Appare quindi indispensabile approfondire maggiormente il ruolo che la luce ha nella vita di tutti i giorni, prestando maggiore attenzione agli effetti visivi, biologici, emotivi che essa ha sugli esseri umani.

Credo che la visione abbia un'importanza fondamentale a livello sociale (per l'apprendimento scolastico, la sicurezza nella guida e sul lavoro, ecc.); appare indispensabile, quindi, migliorare la sua conoscenza in tutti gli ambiti formativi per potersi poi indirizzare verso la prevenzione visiva primaria. La prevenzione è un'arma da mettere subito in campo, attraverso ausili che ci permettano di ridurre l'esposizione a tali radiazioni e facendo un uso coscienzioso della tecnologia. Molto importante è la progettazione degli spazi dove la gente vive, studia e lavora. Lo stesso Zanardi ancora afferma: *“Credo che per coloro che progettano, spazi e oggetti, sia sempre più necessario possedere un minimo di preparazione sulla visione, conoscere tutte le informazioni che permettano poi di partecipare attivamente al miglioramento del benessere sociale, in particolare il benessere visivo che, in questo momento sociologico, è messo maggiormente sotto pressione dai nuovi stili di vita”*.

²³ www.optotticazanardi.it/2019/04/05/vista-e-visione-il-contributo-dellottico-optometrista-nella-prevenzione-primaria-societa-dellimmagine-e-nuovi-stili-di-vita-limportanza-della-progettazione/

Sono importantissimi, quindi, una giusta illuminazione e l'applicazione delle conoscenze derivanti dalle leggi della fisica che condizionano i nostri comportamenti.

Ecco perché ritengo che sia fondamentale essere formati a 360 gradi per contribuire nel migliore dei modi al benessere (prima di tutto visivo) della persona, rimanendo pur sempre nei limiti delle proprie competenze professionali senza invadere la sfera di competenza dell'architetto, dell'ingegnere, del progettista illuminotecnico o di chi esso sia. È, quindi, importante coordinare tutte le competenze in gioco e questo diventa possibile nel momento in cui l'Optometrista, l'Ingegnere, l'Illuminotecnico si affaccia con curiosità a ciò che lo circonda e si pone delle domande per comprendere come, attraverso le proprie conoscenze, le proprie capacità, possa contribuire alla risoluzione di una problematica.

In conclusione sento di voler lasciare un messaggio a chiunque, piccoli e grandi, ma soprattutto ai giovani come me che si apprestano a costruire la propria strada, a trovare il proprio posto nella vita: "Siate curiosi di scoprire, siate curiosi di apprendere e conoscere, siate pronti a mettervi in gioco per continuare a cercare, siate curiosi di tutto e non solo delle cose che possono essere legate al vostro lavoro o passione, siate curiosi nella vita".

Bibliografia

- Brainard G. et al. (2001), Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor, *The Journal of Neuroscience*, 21(16): 6405–6412
- Brown M. (2012), Consumer attitude towards anti-reflection coatings
- BSI (2009), Photobiological safety of lamps and lamp systems, BSI publications
- Buratto L. et al. (2010), *L'occhio, le sue malattie e le sue cure*, Vol. 2, Milano, Springer
- Catalano F. (2002), *Elementi di ottica generale*, Zanichelli Editore
- ISTAT, “Cittadini, imprese e ICT”, statistiche e report Anno 2017, 21 dicembre 2017, https://www.istat.it/it/files//2017/12/ICT_Anno2017.pdf
- Lack L. e Wright H. (2007), Chronobiology of sleep in humans, *Cellular and Molecular Life Sciences*, 64(1205)
- Lucas R. et al. (2012), How rod, cone, and melanopsin photoreceptors come together to enlighten the mammalian circadian clock, *Progress in Brain Research*, 199(1): 1-18
- Lucas R. et al. (2013), Measuring and using light in the melanopsin age, *Trends in Neurosciences*, 37(1): 1-9
- Merola L. (2004), *Esperimentazioni di fisica: Ottica*, 1^a ed., Napoli, Liguori Editore
- Piccoli B. e Orsini S. (1998), *Luce e UV*, 1^a ed., Sovico(MI), Reggiani Editore, (Biblioteca della Luce Reggiani)
- Piccoli B., Orsini S. e Zambelli P. (2001), *Luce blu*, 1^a ed., Sovico(MI), Reggiani Editore, (Biblioteca della Luce Reggiani)
- Rossetti A. e Gheller P. (2003), *Manuale di optometria e contattologia*, 2^a ed., Zanichelli Editore
- Ruby N. et al. (2002), Role of melanopsin in circadian responses to light, *Science*, 298(5601): 2211-2213
- Scott H. et al. (2019), Social media use and adolescent sleep patterns, *BMJ Open*, 9(031161)

Van Der Meijden W. et al. (2019), Restoring the sleep disruption by blue light emitting screen use in adolescents: a randomized controlled trial, Endocrine Abstracts, 63: 652

Zeri F. et al. (2012), Ottica visuale, 1^a ed., Roma, Società Editrice Universo

Sitografia

- <https://www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation> (consultato il 26/10/2020)
- https://issuu.com/marcofabiano/docs/supplemento_b2eyes_protezione_ocula (consultato il 26/10/2020)
- <http://www.progettazioneottica.it/sicurezza-fotobiologica-delle-lampade-normativa-en-62471/620> consultato il 29/10/2020)
- https://it.wikipedia.org/wiki/Apparato_visivo (consultato il 29/10/2020)
- [Il sistema visivo umano](#) (consultato il 29/10/2020)
- https://www.fakt.it/Grandezze_Fisiche.asp (consultato il 29/10/2020)
- <https://www.b2eyes.com/b2eyes-magazine/supplemento-62017-luce-blu-e-patologie-oculari> (consultato il 05/11/2020)
- <https://www.irmed.it/approfondimento/melatonina-azioni-ed-utilita-nell-uomo~2.html> (consultato il 09/11/2020)
- <https://www.iguzzini.com/it/lighthinking/luce-e-benessere-un%E2%80%99illuminazione-per-accompagnare-i-ritmi-circadiani/> (consultato il 12/11/2020)
- <https://www.lightingeurope.org/> (consultato il 12/11/2020)
- <https://www.lumi4innovation.it/human-centric-lighting-illuminazione-smart-al-servizio-delluomo/> (consultato il 12/11/2020)
- <https://www.lrc.rpi.edu/programs/lightHealth/publications.asp> (consultato il 12/11/2020)
- <https://www.hoyavision.com/it/prodotti/per-i-professionisti/trattamenti-antiriflesso/per-lo-stile-di-vita-digitale/> (consultato il 16/11/2020)
- <https://www.zeiss.it/vision-care/ottici-optometristi/prodotti/trattamenti/duravision-blueprotect.html> (consultato il 16/11/2020)
- <https://www.essiloritalia.it/prodotti/eye-protect-system> (consultato il 17/11/2020)
- <https://www.tokai-italia.it/materiali/lutina/> (consultato il 17/11/2020)
- <https://www.optotticazanardi.it/2019/04/05/vista-e-visione-il-contributo-dellottico-optometrista-nella-prevenzione-primaria-societa-dellimmagine-e-nuovi-stili-di-vita-limportanza-della-progettazione/> (consultato il 28/11/2020)

Ringraziamenti