



# Luce di qualità per la **scuola**

*Gli effetti della luce non terminano con l'esperienza della visione. I risvolti non visivi sono molteplici e hanno conseguenze importanti, riscontrabili nel medio/lungo termine. L'articolo presenta le regole base di progettazione illuminotecnica e circadiana per un ambiente scolastico sereno, in cui sia messo al centro il benessere degli studenti e del personale docente*

*M.T. Oricoli, G. Romano\**

## Introduzione

Il Progetto della luce negli ambienti scolastici prende solitamente come spunto iniziale l'esigenza di riduzione dei consumi elettrici. L'efficiamento energetico è infatti

la prima motivazione che spinge il gestore di un complesso scolastico a richiedere l'intervento di tecnici specializzati per definire le migliori strategie

per limitare l'impatto di spesa del servizio luce controllando congiuntamente i costi di gestione nel medio e lungo termine.

Il termine di confronto più evidente è la bolletta, che rappresenta impietosamente l'energia spesa per illuminare le aule, i corridoi, gli ambienti amministrativi e tecnici, le biblioteche, le palestre per un periodo che si sviluppa in maniera intensa lungo tutto l'arco dell'anno scolastico, con un alleggerimento durante il periodo estivo. Se questo è il punto di partenza, perché non lavorare nell'ottica della valorizzazione dell'energia messa in campo, guardando alla "qualità" oltre che alla "quantità"? Per fare ciò è necessario che tutti gli attori del processo, amministratori, progettisti, imprese esecutrici e perché no, fruitori, siano consapevoli del valore che si cela in un progetto di buona luce e quale leva virtuosa possa costituire non solo per l'efficienza impiantistica, ma anche e soprattutto per il benessere degli utenti.

Non è da sottovalutare il fatto che negli ambienti dedicati all'istruzione, a tutti i livelli, dalla scuola dell'infanzia alle università, l'efficacia dell'apprendimento è infatti strettamente legata alla percezione del benessere e del comfort ambientale declinato tipicamente in termico, acustico e di illuminazione.

In merito a quest'ultima, innume-

revoli studi scientifici in ambito illuminotecnico e medico hanno sinergicamente confermato che la buona luce è determinante non solo per la percezione dell'ambiente e di ciò che ci circonda, ma anche per il benessere e la salute delle persone in senso più generale.

Il ruolo della buona luce è infatti fondamentale perché stimolando la concentrazione e l'attenzione, contribuisce ad aumentare le prestazioni e a ridurre gli errori, consentendo di tradurre efficacemente in informazione quindi in conoscenza gli stimoli visivi esterni.

Si intuisce che il concetto di illuminazione comporta dei risvolti di tipo non visivo che rappresentano delle peculiarità necessarie specie negli ambienti scolastici dove studenti, insegnanti e operatori passano quotidianamente molta parte del loro tempo, sia esso diurno o serale.

Ecco perché è importante fare sintesi dei principi base di illuminotecnica per poter offrire un progetto di qualità o, dall'altro lato, per essere consapevoli che quanto è stato realizzato risponde al meglio possibile ai requisiti prestazionali e di benessere.

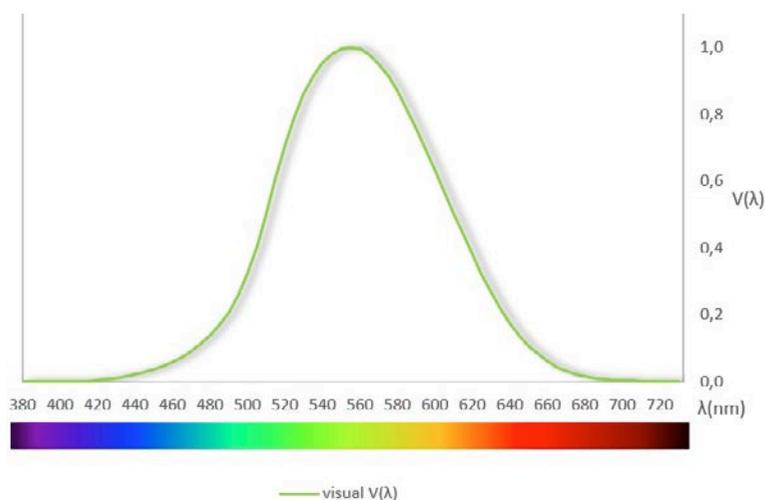


FIGURA 1 Curva di visibilità fotopica

## Fenomeno della visione

Generalmente diamo per scontato il fatto di "vedere bene" quanto ci circonda ossia ci accorgiamo di affaticamento e/o discomfort nel momento in cui abbagliamenti molesti, livelli di illuminamento troppo limitati o esageratamente elevati, alternanze marcate di luci e ombre, ci costringono a sforzare i nostri occhi per mettere a fuoco.

Il processo della visione è tanto complesso quanto soggettivo. L'occhio umano percepisce lo stimolo luminoso per lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica comprese fra 380 nm e 780 nm con sensibilità diverse a seconda della lunghezza d'onda. Raggi ultravioletti e infrarossi sono ai confini estremi, al di fuori della banda del visibile.

Con visione fotopica si intende la modalità di percezione e di risposta delle cellule retiniche agli stimoli luminosi con livelli di illuminamento tipici del contesto diurno. La curva di sensibilità fotopica  $V(\lambda)$  (Figura 1) rappresenta di conseguenza la sensibilità spettrale della retina umana in risposta agli stimoli luminosi nella fascia del visibile, determinata su un campione di soggetti umani.

Sulla base della visione fotopica sono costruite le valutazioni e le metriche illuminotecniche che portano a definire quantitativamente i livelli di illuminamento in lux che troviamo come riferimenti normativi da adottare nei progetti.

## Fotorecettori retinici

La radiazione luminosa restituita per riflessione dagli oggetti che ci circondano attraversa la cornea, il cristallino e il corpo vitreo e giunge sulla retina ove stimola i fotorecettori che provvedono a trasmettere il segnale al cervello che lo decodifica e lo rielabora, trasformandolo infine in immagine.

Sulla retina sono presenti principalmente tre tipologie di fotorecettori: i coni e i bastoncelli sono i più conosciuti perché strettamente legati al fenomeno tangibile e immediatamente percepibile della visione.

I coni, concentrati nella parte centrale della retina, sono in grado di percepire i colori in condizioni fotopiche cioè con livelli di illuminamento elevati. I bastoncelli, più numerosi dei coni e distribuiti sulla zona periferica della retina, essendo molto sensibili alla luce, lavorano in condizioni scotopiche, cioè con livelli di illuminamento molto bassi, tipicamente in scala di grigi e con ampia visione.

Alla fine del '900 sono state introdotte le prime

evidenze degli studi su una terza tipologia di fotorecettori presenti sulla retina (ipRGCs, Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells), fotosensibili alla radiazione elettromagnetica come i coni e i bastoncelli, ma, a differenza di questi, con effetti “non visivi” (non-image forming responses) [1] e “non immediati”, strettamente legati alla sincronizzazione dei ritmi circadiani e al ritmo sonno/veglia perché direttamente connessi con la produzione giornaliera di melatonina e cortisolo (Figura 2).

In analogia a quanto accade per la visione fotopica, la risposta “non visiva” del nostro organismo agli stimoli della luce, dovuta appunto alla sensibilità dei recettori ipRGCs, è rappresentata dalla curva  $m(\lambda)$  detta di sensibilità melanopica. Sulla base della curva  $m(\lambda)$  sono state sviluppate le metriche per la valutazione oggettiva dello spettro luminoso sotto l’aspetto circadiano.

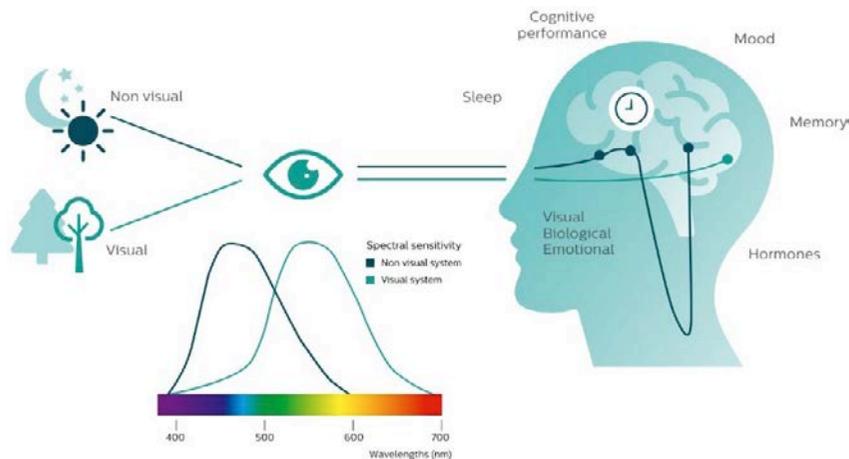


FIGURA 2 Effetti visivi e non visivi della luce (Philips)

## Luce che trasforma le immagini in informazioni

### Riferimenti di partenza – la normativa

Regola d’oro: il progetto non parte se non sono chiari i riferimenti normativi da rispettare. Le norme specifiche per l’illuminazione in ambito scolastico sono la UNI EN 12464-1 (in particolare prospetti 43 e 44) e la UNI 10840 [2], le quali individuano le prestazioni illuminotecniche di un impianto in relazione alla tipologia di utenti e di funzioni e ai diversi compiti visivi. In esse si trovano declinati i principali concetti illuminotecnici quali illuminamento, uniformità, resa cromatica, abbagliamento, illuminamento cilindrico.

In generale, il livello di illuminamento dei compiti visivi cambia in relazione sia al livello di impegno visivo degli allievi sia ai diversi scenari che si possono oramai creare in aula: lezione tradizionale, utilizzo della LIM, proiezioni, lavoro individuale su videotermini, lavori di gruppo, ecc. . .

La norma pone l’attenzione, oltre che al compito visivo, cioè all’area specifica in cui viene svolta l’attività, anche all’ambiente in cui esso è inserito, dando dei riferimenti di illuminamento e uniformità anche per pareti e soffitti (Figura 3). L’ambiente luminoso nel suo insieme influenza, infatti, la prestazione visiva quindi il benessere delle persone. La distribuzione bilanciata delle luminanze all’interno del campo visivo è infatti alla base della nitidezza della visione (acuità visiva), della sensibilità al contrasto e dell’efficienza delle funzioni oculari.

In contesto scolastico il riconoscimento e la comu-

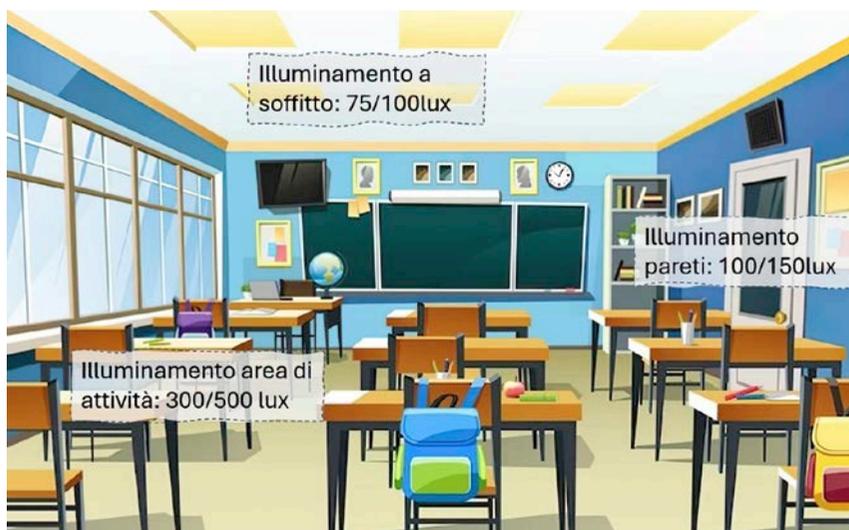


FIGURA 3 Livelli di illuminamento consigliati

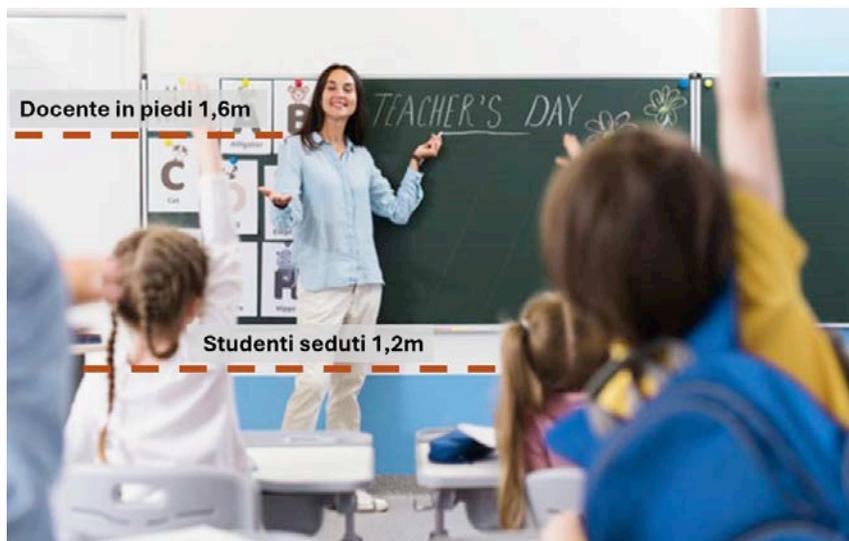


FIGURA 4 Illuminamento cilindrico



FIGURA 5 Scuola 2.0



FIGURA 6 Temperatura di colore della luce

nicazione visiva sono imprescindibili. Per questo, per favorire l'interazione, la comunicabilità e la trasmissione efficace delle informazioni e per il riconoscimento di oggetti e persone in movimento all'interno dello spazio, la norma introduce il concetto di illuminamento cilindrico  $E_{m,z}$ . L'illuminamento infatti deve essere reso anche in senso "volumetrico" in ambiente e su diversi piani, tipicamente a 1,6 m da terra se riferito a persone in piedi e 1,2 m per persone sedute (Figura 4).

L'indice UGR (Undefined Glare Rating) identifica con un numero l'abbagliamento riferito a un determinato punto di osservazione. Tanto è complicata la formula per il calcolo dell'UGR tanto è immediato il riscontro nell'esperienza quotidiana. Si sperimenta il fenomeno dell'abbagliamento quando nel nostro campo visivo si presentano aree a luminanza elevata o a elevato contrasto di luminanza come superfici illuminate, sorgenti luminose, aperture finestrate oltre che riflessioni della luce su oggetti o superfici riflettenti (super-

fici vetrate o lucide, monitor ecc.).

La valutazione dell'abbagliamento in ambiente è estremamente importante, poiché indici troppo elevati provocano limitazioni della prestazione visiva specie in persone con difetti al campo visivo oltre che difficoltà di adattamento e ridotta visione di contrasto.

Per garantire il rispetto dei limiti di abbagliamento non basta fermarsi alla dichiarazione della scheda tecnica dell'apparecchio di illuminazione che si intende utilizzare. Certo, è un buon punto di partenza. Occorre altresì valutare con il calcolo svariate variabili ambientali come le caratteristiche spaziali e colorimetriche dell'ambiente, la disposizione e l'orientamento degli apparecchi, il punto di vista dell'osservatore.

Nel caso degli ambienti scolastici attuali in cui vi è la necessità di utilizzare ausili digitali (tablet, monitor, LIM, ...) e in cui la direzione di osservazione prevalente non è solo quella verso il banco, ma spazia secondo molteplici direzioni, la valutazione dell'UGR e degli abba-

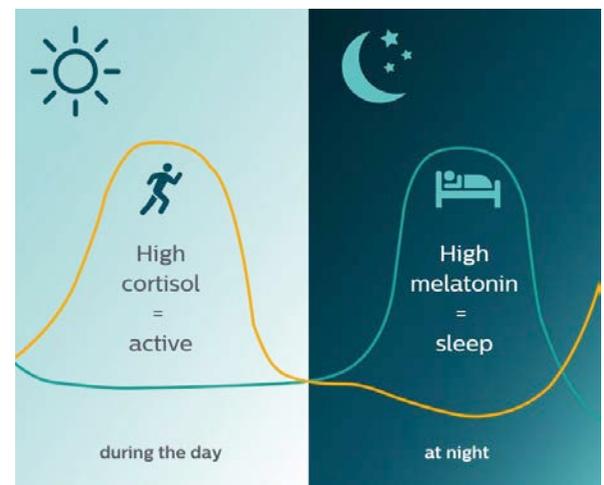
gliamenti per riflessione hanno un peso e conseguenze molto importanti in termini di benessere ed efficacia della percezione delle immagini (Figura 5).

La scelta della temperatura di colore della luce (Figura 6) è spesso soggetta a gusto personale o legata all'aspetto cromatico di insieme dell'ambiente e degli arredi. Tuttavia, questa scelta legata alla distribuzione dello spettro luminoso delle sorgenti non è banale considerando, per completezza di informazione, gli effetti di tipo fisiologico che può innescare. Nel caso di fruizione prolungata degli spazi durante l'arco della giornata l'adozione di sistemi di illuminazione artificiale basati sulla variazione, oltre che della quantità di luce, anche della temperatura di colore delle sorgenti porterebbe ad assecondare la corretta sincronizzazione dell'orologio biologico.

## Luce per il benessere psicofisico e l'attenzione

Fino a questo punto abbiamo descritto la luce sotto l'aspetto ottico e visivo: il raggio luminoso riflesso dagli oggetti colpisce coni e bastoncelli sul fondo della retina e il cervello provvede a elaborare lo stimolo da essi trasmesso in immagini e quindi in informazioni per l'apprendimento. Come già accennato c'è qualcos'altro, oltre

**La luce interviene sulla sincronizzazione del nostro orologio biologico e sulla regolazione della produzione di ormoni quali la melatonina e il cortisolo responsabili delle nostre attitudini alla veglia o al riposo. Si intuisce che la mala regolazione del ritmo circadiano porta all'alterazione del nostro orologio biologico, con discomfort e malessere che si traducono in minore produttività, discontinuità nell'attenzione, affaticamento, aumento degli errori, depressione.**



a ciò che vediamo. Abbiamo tutti presente come in natura il variare della luce influenzi il comportamento di animali e piante. L'uomo non è certo escluso, avendo adattato il proprio orologio biologico al susseguirsi giornaliero e ciclico, circadiano appunto, fra giorno e notte. Proprio per la complessa sinergia degli aspetti visivi e non visivi della luce, il CIE, Comitato Internazionale per l'Illuminazione, ha introdotto il concetto di "Integrative lighting" [3], vale a dire "luce integrata", indicando nella luce il principale agente sincronizzatore del nostro orologio biologico.

Il progetto dell'illuminazione artificiale può influenzare profondamente questo meccanismo studiando la qualità e la quantità di luce più adatta in relazione all'ambiente e alla funzione ovvero al momento di utilizzo, specie nei casi in cui le attività si protraggono per lungo tempo in ambienti confinati.

### Sensibilità fotopica e melanopica

Parlando degli effetti della luce sul nostro orologio biologico, capita spesso che si rimanga a un livello superficiale di trattazione ritenendo il tutto molto soggettivo. È necessario comprendere che, a valle degli studi di tipo medico, in ambito illuminotecnico sono state individuate delle metodologie di calcolo che permettono di valutare la bontà e l'efficacia di un impianto di illuminazione in relazione alla tipologia spettrale delle sorgenti luminose scelte.

Accanto alla curva di visibilità  $V(\lambda)$ , che pesa lo stimolo visivo fotopico in relazione alla componente spettrale della luce, entra in gioco la curva  $m(\lambda)$  che rappresenta la sensibilità dei fotorecettori responsabili degli effetti sui cicli circadiani (Figura 7). Si nota come la sensibilità spettrale dei recettori visivi fotopici (coni e bastoncelli), pur se simile, è sfalsata rispetto a quella dei recettori non visivi (cellule gangliari). Il picco di sensibilità spettrale fotopica è intorno ai 555 nm, mentre quella non visiva è intorno ai 490 nm. Questo comporta che, a parità di illuminamento fotopico, cioè a parità di lux sul compito visivo, differenti tipologie di sorgenti luminose ossia sorgenti con spettri di emissione diversi possono avere diversi effetti circadiani, specie se la differenza si manifesta nella fascia delle lunghezze d'onda più piccole.

In ambito fotopico, ovvero quando si parla di "effetti visivi" della luce, sono disponibili dati numerici sia in fase di progetto grazie al calcolo illuminotecnico che in campo mediante le misure effettuabili con lo strumento chiamato luxmetro.

### Effetti non visivi della luce in ambito scolastico

- **Mantenimento dei livelli di concentrazione e attenzione durante le attività scolastiche**
- **Diminuzione degli errori**
- **Riduzione della sonnolenza e influenza sull'umore con riduzione dei comportamenti aggressivi**
- **Miglioramento della qualità del sonno notturno con aumento del rendimento scolastico**

### Idee per una illuminazione ottimale

- **Scelta attenta dello spettro luminoso delle sorgenti con elevato indice melanopico**
- **Impostazione di diversi scenari di luce in relazione alle diverse attività:**
  - **illuminamento elevato con temperature fredde per attività che richiedono concentrazione;**
  - **illuminamento regolabile con tonalità più calde per attività più semplici o di sostegno**
- **Regolazione della luce artificiale in base al contributo di luce naturale**

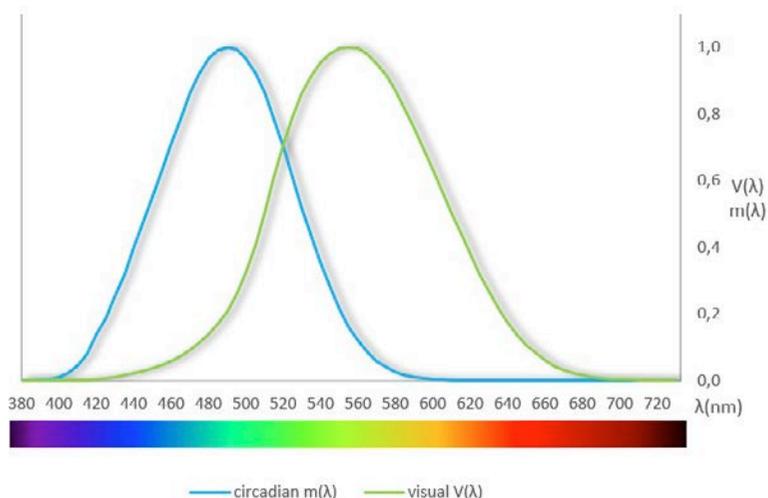
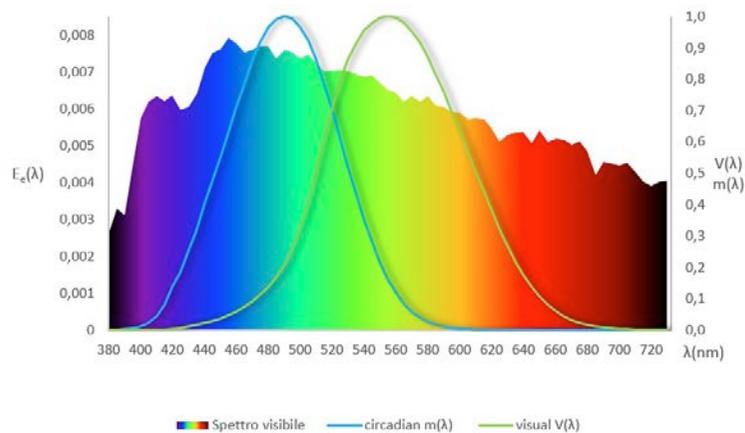


FIGURA 7 Curve di sensibilità fotopica e melanopica

**D65 è definito "illuminante solare standard" ovvero "luce diurna media del mezzogiorno del cielo del nord" con temperatura di colore di 6500 K.**





**FIGURA 8** Curve di irradianza spettrale della luce solare e curve di sensibilità  $V(\lambda)$  e  $m(\lambda)$

In ambito “non visibile”, pur non essendo al momento possibile misurare con strumenti il contributo melanopico delle sorgenti luminose, è possibile calcolare l’efficacia in termini melanopici delle sorgenti luminose adottate.

Il CIE propone un modello di calcolo sviluppato dal Lucas Group dell’Università di Manchester [4] che mette a confronto e pesa lo spettro emissivo della sorgente artificiale da valutare con lo spettro standard della luce naturale D65, per arrivare a calcolare il rapporto melanopico di efficienza relativo alla luce diurna mDER (melanopic Daylight Efficacy Ratio).

Tale indice rappresenta di fatto l’efficacia in termini di risposta melanopica di una sorgente artificiale messa a confronto con la luce naturale (Figura 8).

Al giorno d’oggi la maggior parte della popolazione, utenti delle scuole compresi, passa purtroppo molto tempo in ambienti confinati, con un rapporto osmotico e visivo con l’ambiente esterno molto limitato se non assente. Peraltro, per limitare l’impatto termico in ambiente, la luce naturale viene schermata e attivata la luce artificiale, essendo questa la condizione

più favorevole per il bilancio energetico generale dell’edificio. La luce artificiale diventa pertanto imprescindibile per lo svolgimento delle attività e per avere anche degli effetti sui cicli circadiani dovrebbe quindi essere il più naturale possibile ovvero dovrebbe idealmente seguire in quantità e qualità spettrale l’andamento della luce solare.

### Protocollo Well e lux melanopici

Se il protocollo Leed si prefigge il raggiungimento della sostenibilità ambientale di un edificio, il protocollo Well (Well Building Standard) [5], lanciato nel 2014, pone come obiettivo il benessere degli utenti che ci abitano indicando delle strategie per i vari contesti e secondo varie categorie (aria, acqua, luce, comfort termico, ecc...).

Per quanto riguarda l’illuminazione, il protocollo Well identifica 13 requisiti. In particolare, il requisito n.54 “Circadian lighting design”, per preservare gli effetti biologici della luce sugli esseri umani, si pone come scopo la definizione di una soglia minima di componente circadiana identificata con una grandezza

denominata EML ovvero lux melanopici equivalenti.

La metrica proposta deriva dalla ponderazione della radiazione elettromagnetica visibile in base alla sensibilità delle cellule gangliari ipRGC piuttosto che ai coni, come avviene per la teoria fotopica tradizionale.

Per la verifica delle prestazioni, gli EML devono essere misurati/calcolati sul piano verticale all’altezza degli occhi dell’utente. Di fatto, per ottenere il valore dei lux melanopici equivalenti, il valore dei lux fotopici misurati/calcolati sul piano verticale all’altezza degli occhi dell’utente deve essere moltiplicato per l’indice denominato mDER melanopic Daylight Efficacy Ratio.

Oramai, molti produttori di apparecchi di illuminazione danno evidenza dell’indice mDER nella scheda tecnica degli apparecchi per indicare la bontà della sorgente led ovvero quanto questa si avvicina allo spettro naturale preso come standard di confronto.

### Definizione dell’indice mDER

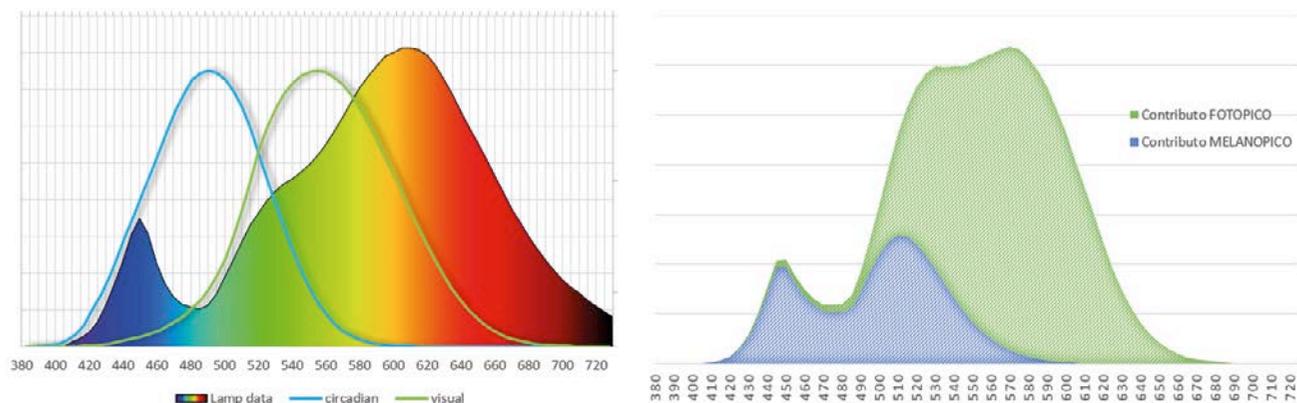
Lo spettro luminoso emesso dalla sorgente artificiale viene pesato sulla curva di sensibilità melanopica  $m(\lambda)$ ; l’area sottesa dalla curva risultante rappresenta il contributo melanopico della radiazione artificiale [6].

Analogamente, l’area della curva sottesa dallo spettro pesato sulla curva di sensibilità fotopica  $V(\lambda)$  rappresenta il contributo fotopico come siamo soliti definire e individuare mediante la metrica illuminotecnica tradizionale.

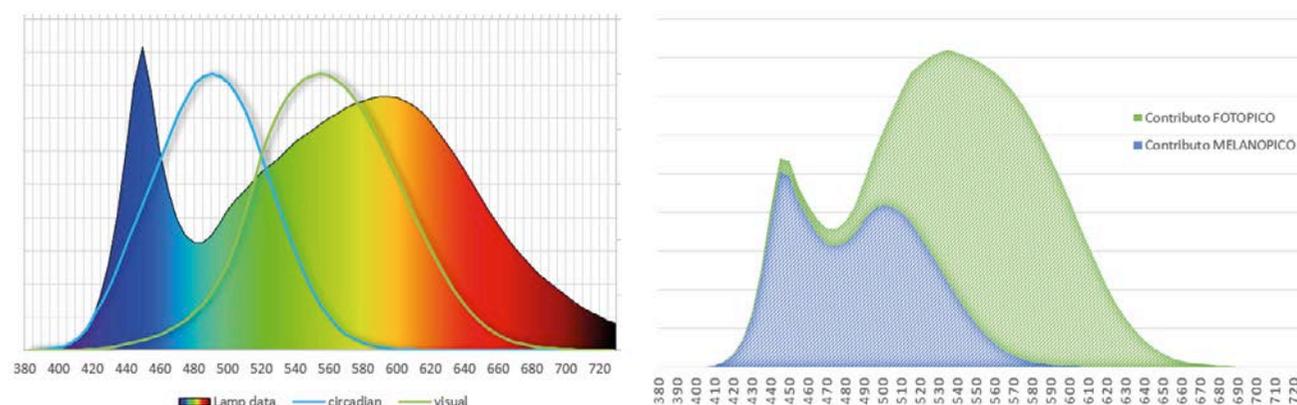
Mettendo a confronto la sorgente artificiale a led con la sorgente standard solare D65, quest’ultima modulata al fine di avere la medesima componente circadiana rispetto alla sorgente artificiale, si può notare come la componente fotopica della sorgente artificiale sia più elevata rispetto a quella della sorgente naturale definita come mEDI (melanopic Equivalent Daylight Illuminance).

Il rapporto fra componente fotopica naturale mEDI rispetto alla componente fotopica artificiale rappresenta appunto l’indice mDER. Tanto più questo indice è elevato, tanto più simile alla luce naturale è la sorgente artificiale presa in considerazione.

A titolo di esempio, nelle immagini seguenti (Figure 9-10-11-12) sono messe a confronto alcune sorgenti luminose, diverse per tipologia e per temperatura di colore. Per ciascuna di esse è stato valutato l’indice mDER. Si nota la differenza in termini di efficacia circadiana a seconda della tipologia di sorgente e di temperatura di colore.



**FIGURA 9** Curva di irradianza spettrale LED 2700 K e riscontro del contributo melanopico (mDER = 0,445)



**FIGURA 10** Curva di irradianza spettrale LED 4000 K e riscontro del contributo melanopico (mDER = 0,76)

### Calcolo dei lux melanopici equivalenti

Una volta noto l'indice mDER, derivato dal data sheet dell'apparecchio di illuminazione o da calcolo in base allo spettro di emissione della sorgente artificiale, è possibile quindi calcolare il valore dei lux melanopici equivalenti per

confrontarli con i valori limite indicati, ad esempio, dal protocollo Well (Figura 13).

Lo scopo è quello di valutare la bontà della soluzione illuminotecnica in termini di effetti circadiani.

### Conclusioni

In ambito scolastico ed educativo, la luce ha un ruolo fondamentale per vedere in maniera corretta e tradurre in modo efficace le immagini in informazione e quindi in apprendimento. Esistono anche effetti non visivi della luce che influiscono sul nostro orologio biologico.

Lo studio dell'impianto di illuminazione, a partire dalla scelta dei corpi illuminanti e dalla valutazione della qualità delle sorgenti luminose ha effetti decisivi in termini di benessere e comfort sul nostro organismo sia nel breve che nel lungo termine. In particolare, gli aspetti "non visivi" della luce hanno conseguenze non banali sul nostro organismo

**Curva dello spettro luminoso emesso dalla sorgente:** curva di irradianza spettrale prodotta dalla sorgente espressa in  $W/(m^2 \text{ nm})$

**Area sottesa dallo spettro luminoso emesso dalla sorgente:** irradianza della sorgente espressa in  $W/m^2$

**Curva  $V(\lambda)$ :** curva di sensibilità fotopica che assume valore massimo pari a 1 in corrispondenza della lunghezza d'onda di 555 nm

**Curva  $m(\lambda)$ :** curva di sensibilità melanopica che assume valore 1 in corrispondenza della lunghezza d'onda di 490 nm

**Area sottesa dalla curva prodotto dello spettro luminoso della sorgente pesata su  $V(\lambda)$ :** irradianza pesata sulla curva di visibilità dell'occhio umano e proporzionale all'illuminamento (fotopico)

**Area sottesa dalla curva prodotto dello spettro luminoso della sorgente pesata su  $m(\lambda)$ :** irradianza pesata sulla curva di visibilità dell'occhio umano e proporzionale all'illuminamento con effetti circadiani (melanopico)

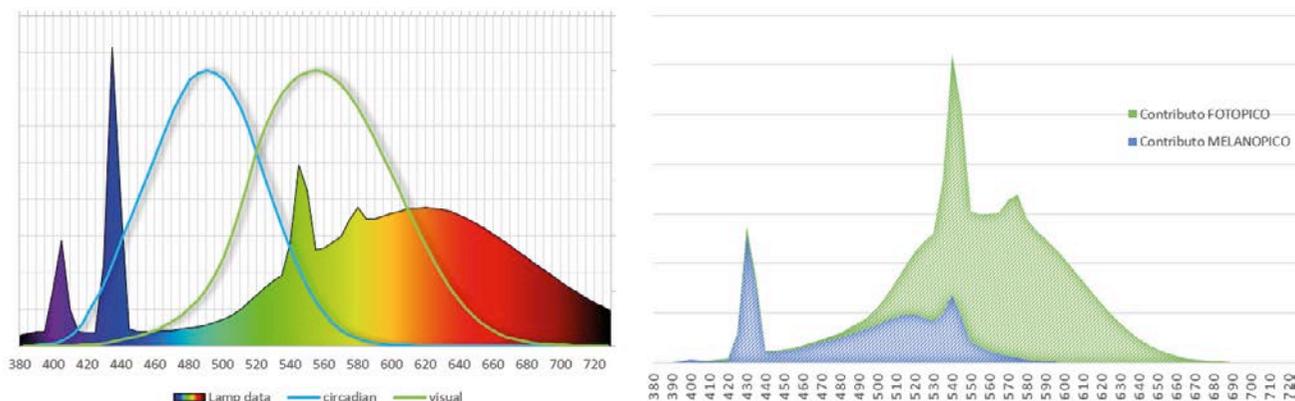


FIGURA 11 Curva di irradianza spettrale FL 2950 K e riscontro del contributo melanopico (mDER = 0,429)

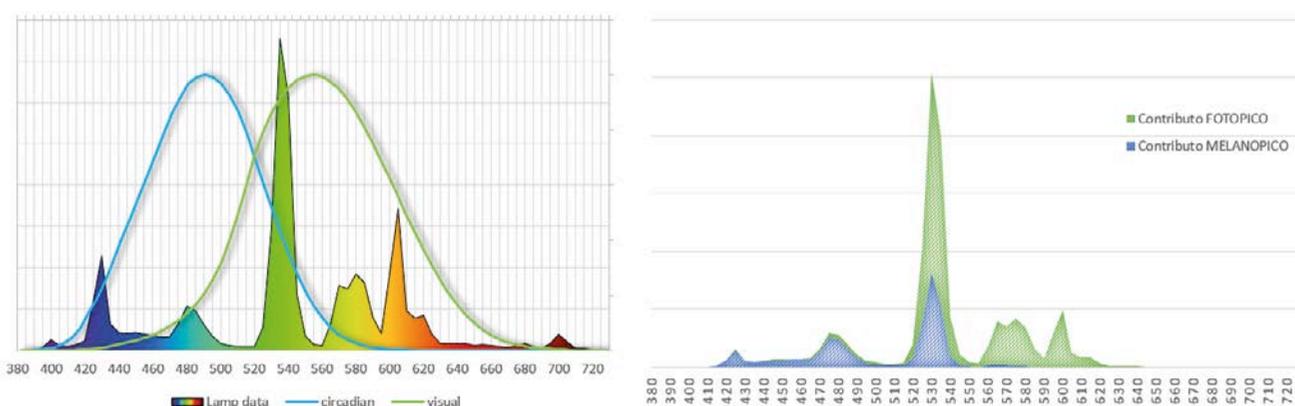


FIGURA 12 Curva di irradianza spettrale LED 4000 K e riscontro del contributo melanopico (mDER = 0,588)

e di conseguenza sul nostro stare bene. Pur sembrando un enunciato in forte antitesi, la luce artificiale deve essere il più naturale possibile. Il corretto dimensionamento e la qualità dell'impianto di illuminazione e della sua gestione diventano pertanto cruciali per creare le migliori condizioni ambientali per lo svolgimento delle attività scolastiche e per il benessere degli studenti e degli operatori, sia nel breve sia nel lungo termine. ■

\* Maria Teresa Oricoli, Giuseppe Romano, Manens Spa

**PART 4**  
**Melanopic Light Intensity in Learning Areas**

At least one of the following requirements is met:

- a. Early education, primary and secondary schools, and adult education for students primarily under 25 years of age: Light models (which may incorporate daylight) show that at least 125 equivalent melanopic lux is present at 75% or more of desks, on the vertical plane facing forward 1.2 m [4 ft] above finished floor (to simulate the view of the occupant). This light level is present for at least 4 hours per day for every day of the year.

VERIFICATION

**Letter of Assurance**

- Architect

**On Site**

- Spot Check

FIGURA 13 Protocollo Well e riferimento ai lux melanopici richiesti negli ambienti scolastici

### BIBLIOGRAFIA E WEBGRAFIA

- [1] UNI EN 12464-1: 2021 appendice B.5 L'influenza della distribuzione della potenza spettrale sugli effetti anidolici che non formano immagine
- [2] UNI EN 12464-1 e UNI 10840
- [3] CIE Integrative Lighting — Non-visual effects
- [4] <https://lucasgroup.lab.manchester.ac.uk/measuringmelanopicilluminance/>
- [5] <https://standard.wellcertified.com/light/circadian-lighting-design>
- [6] prof. Laura Bellia "Prescrizioni per un'illuminazione che favorisca la sincronizzazione dei ritmi biologici"